



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



ANA PAULA FONSECA KUPPER

**BIOMASSA DOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE ÁRVORES DE
EUCALIPTO SOB MANEJO DA TALHADIA E ALTO FUSTE**

Botucatu

2023

ANA PAULA FONSECA KUPPER

**BIOMASSA DOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE ÁRVORES DE
EUCALIPTO SOB MANEJO DA TALHADIA E ALTO FUSTE**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Ciências Florestal

Orientador: Otávio Camargo Campoe

Coorientador(a): Túlio Barroso Queiroz

Botucatu

2023

K96b

Kupper, Ana Paula Fonseca

Biomassa dos diferentes compartimentos de árvores de Eucalipto sob manejo da talhadia e alto fuste / Ana Paula Fonseca Kupper. -- Botucatu, 2023

82 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientador: Otávio Camargo Campoe

Coorientador: Túlio Barroso Queiroz

1. Silvicultura. 2. Biomassa florestal. 3. Produtividade. 4. Modelagem florestal. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: BIOMASSA DOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE ÁRVORES DE EUCALIPTO SOB MANEJO DE TALHADIA E ALTO FUSTE

AUTORA: ANA PAULA FONSECA KUPPER

ORIENTADOR: OTÁVIO CAMARGO CAMPOE

COORIENTADOR: TÚLIO BARROSO QUEIROZ

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência Florestal, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. OTÁVIO CAMARGO CAMPOE (Participação Virtual)
Ciências Florestais / Universidade Federal de Lavras



Documento assinado digitalmente
OTAVIO CAMARGO CAMPOE
Data: 01/05/2024 08:49:46-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Pesquisador Dr. JOSÉ HENRIQUE TERTULINO ROCHA (Participação Virtual)
. / Geplant Tecnologia Florestal Ltda.



Documento assinado digitalmente
OTAVIO CAMARGO CAMPOE
Data: 01/05/2024 08:50:26-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. RODRIGO EIJI HAKAMADA (Participação Virtual)
Ciências Florestais / Universidade Federal Rural de Pernambuco



Documento assinado digitalmente
OTAVIO CAMARGO CAMPOE
Data: 01/05/2024 08:51:07-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Botucatu, 19 de setembro de 2023

*A minha querida mãe e tia,
Elza e Maria Helena,
dedico*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, fé e a coragem de superar as dificuldades. Ao meu Orientador Dr. Otávio Camargo Campoe, pela oportunidade, confiança e compreensão.

Ao meu Co-orientador Dr. Túlio Barroso Queiroz pela amizade, conhecimento compartilhado na coorientação, apoio incondicional em todas as etapas do mestrado. E principalmente ao Cristián Montes, que me auxiliou e conduziu na elaboração dos modelos matemáticos.

À empresa Bracell Bahia, em especial a equipe de pesquisa e extensão: Túlio, Gardenia, Maria Fernanda, Iago, Liamara, Mário, Leonardo, João Filipi, Kellen, Raoni, Odair, Mariana, Elane, Vitor, Lucas, Alexandre, Carlos, Wagner, Sidinei, Jacyr, Edson e todos da equipe de campo pelo apoio, coleta de dados e construção desse trabalho. À banca de qualificação e defesa realizada por Dra. Liamara Masullo, Dra. Celina Arcanjo, Dr. José Henrique Tertulino Rocha e Dr. Rodrigo Eiji Hakamada pelas excelentes sugestões e contribuições neste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e todos os professores e funcionários da FCA.

À minha mãe e tia, Elza e Maria Helena pelo carinho, compreensão, apoio e força em todos os momentos. A meu noivo pelo incentivo e torcida no dia-a-dia.

As pessoas queridas e importantes que partiram durante essa caminhada.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão dessa etapa.

"Às vezes, a força que você procura está dentro de você. Você só precisa encontrar a coragem para deixá-la brilhar".

- Autor desconhecido

RESUMO

Os manejos de alto fuste e talhadia no eucalipto desempenham um papel fundamental no setor florestal e na tomada de decisões estratégicas. É importante para compreender seus efeitos na dinâmica do ecossistema, na produtividade, na qualidade da madeira, na ciclagem de nutrientes e nos impactos ambientais. Além disso, pesquisas com essa temática permitem identificar as melhores práticas de manejo para otimizar a produção de madeira, minimizar os custos de produção e reduzir os impactos no meio ambiente. Uma ferramenta valiosa para o estudo dos manejos de alto fuste e talhadia é a modelagem, que permite simular diferentes cenários e estimar os efeitos das práticas de manejo nas variáveis de interesse, como crescimento das árvores, estoque de carbono, consumo de água, entre outros. Essas informações modeladas podem ser usadas para embasar decisões de manejo, como a definição da densidade de plantio, a rotação de cultivo, momento ótimo de colheita. Além disso, pode auxiliar na identificação dos pontos críticos como da avaliação dos efeitos da densidade de plantio, prever o crescimento e a produção florestal em diferentes cenários de manejo que podem afetar a produtividade e a sustentabilidade das plantações. Isso permite a implementação de práticas mais eficientes e ambientalmente adequadas. O objetivo deste estudo é duplo: em primeiro lugar, realizar uma revisão abrangente sobre a biomassa aérea e radicular bem como a influência do carbono de povoamentos de eucalipto sob manejo de alto fuste e talhadia, incluindo o uso de modelagens. Em segundo lugar, realizar o ajuste simultâneo para os componentes (galho, folha, fuste e raiz) em contextos de manejo de alto fuste e talhadia. Por fim, este estudo visa recomendar modelos parametrizados para estimativas mais precisas, especialmente na região do Litoral Norte do Estado da Bahia.

Palavras-chave: Crescimento; Produtividade; Equações; Manejo florestal.

ABSTRACT

The high forest and coppice management in eucalyptus play a fundamental role in the forestry sector and strategic decision-making. It is important to understand their effects on ecosystem dynamics, productivity, wood quality, nutrient cycling, and environmental impacts. Additionally, research on this topic allows for the identification of best management practices to optimize wood production, minimize production costs, and reduce environmental impacts. A valuable tool for studying high forest and coppice management is modeling, which allows for the simulation of different scenarios and estimation of the effects of management practices on variables of interest, such as tree growth, carbon stock, water consumption, among others. This modeled information can be used to support management decisions, such as defining planting density, crop rotation, and optimal harvesting time. Additionally, it can help identify critical points such as evaluating the effects of planting density, predicting forest growth and production in different management scenarios that may affect plantation productivity and sustainability. This allows for the implementation of more efficient and environmentally appropriate practices. The objective of this study is twofold: firstly, to conduct a comprehensive review of aboveground and root biomass as well as the influence of carbon in eucalyptus stands under reform and coppice management, including the use of modeling. Secondly, to perform simultaneous adjustment for components (branch, leaf, stem, and root) in reform and coppice management contexts. Finally, this study aims to recommend parameterized models for more precise estimates, especially in the North Coast region of Bahia State.

Keywords: Growth; Productivity; Equations; Forest management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 2 – Biomassa dos diferentes compartimentos de árvores de eucalipto sob manejo da talhadia e alto fuste

- Figura 1 – Localização das unidades experimentais no estado (Bahia) e cidade (Entre Rios) situados no Litoral Norte baiano no município de Entre Rios – Bahia.....56
- Figura 2 – Etapas de coleta de dados (A) Inventário florestal, (B) Cubagem rigorosa, (C) Biomassa aérea de pesagem de galho, (D) Biomassa aérea de pesagem de lenho, (E) Discos separados por seções e (F) Biomassa de raízes.....57
- Figura 3 – Ilustração da localização onde a árvore foi fracionada.....58
- Figura 4 – Volume individual (m^3) de *Eucalyptus urophylla*, sob manejo de alto fuste (H) e talhadia (C) aos dois, três, quatro e cinco anos de idade no município de Entre Rios, Bahia.....63
- Figura 5 – Acúmulo de biomassa ($Mg\ ha^{-1}$) de *Eucalyptus urophylla*, aos dois, três, quatro e cinco anos de idade, sob manejo de alto fuste e talhadia (A). Acúmulo de biomassa nos compartimentos, Folha (Leaves), Galho (Branches), Fuste (Stem) e Raíz (Stump) para o manejo de alto fuste e talhadia no município de Entre Rios, Bahia (B).....64
- Figura 6 – Distribuição da biomassa (%) de *Eucalyptus urophylla* por compartimento: folha (Leaves), galho (Branches), fuste (Stem) e raízes (Stump), aos dois, três, quatro e cinco anos de idade, sob manejo de alto fuste (A) e talhadia (B), no município de Entre Rios, Bahia.....67
- Figura 7 – Modelos de equação para os compartimentos de folhas (leaves), galhos (branches), fuste (stem) e raízes (stump) no manejo de Alto fuste.....70
- Figura 8 – Modelos de equação para os compartimentos de folhas (leaves), galhos (branches), fuste (stem) e raízes (stump) no manejo de Talhadia.....71
- Figura 9 – Análise de biomassa ($kg.tree^{-1}$) de valores predicted e observed para os compartimentos: branches (WB), leaves (WL), stem (WS), stump (WR) e total height (WT) para os manejos Alto fuste e Talhadia.....72

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2 – Biomassa dos diferentes compartimentos de árvores de eucalipto sob manejo da talhadia e alto fuste

Tabela 1 – Mapa de calor com (A) temperatura média (°C), (B) precipitação (mm) e (C) déficit hídrico mensal da área estudada e os 6 anos que o estudo ocorreu, no município de Entre Rios – Bahia.....	54
Tabela 2 – Localização dos tratamentos de <i>Eucalyptus urophylla</i> , com manejo, data de plantio e idade.....	56
Tabela 3 – Teste de T-Student aos dois, três, quatro e cinco anos de idade, sob manejo de alto fuste e talhadia.....	65
Tabela 4 – Parâmetros estimados para funções de biomassa.....	69

SUMARIO

INTRODUÇÃO GERAL	21
CAPÍTULO 1	24
EXPLORANDO A BIOMASSA DO COMPONENTE ARBÓREO EM SISTEMAS DE TALHADIA E ALTO FUSTE: UMA ANÁLISE ABRANGENTE	24
1.1 INTRODUÇÃO	25
1.2 REVISÃO DE LITERATURA	27
1.2.1 Estoque de carbono	27
1.2.2 Manejo de talhadia e alto fuste	30
1.2.3 Modelo clássico x Modelagem integrada	33
1.3 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS.....	40
CAPÍTULO 2	50
BIOMASSA DOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE ÁRVORES DE EUCALIPTO SOB MANEJO DA TALHADIA E ALTO FUSTE	50
2.1 INTRODUÇÃO	51
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	53
2.2.1 Área de estudo e delineamento experimental	53
2.2.2 Crescimento das árvores e cubagem rigorosa.....	57
2.2.3 Amostragem destrutiva de biomassa aérea e radicular	58
2.2.4 Análise e validação dos modelos	59
2.3 RESULTADOS.....	62
2.4 CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS.....	75
CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS.....	81

INTRODUÇÃO GERAL

A sazonalidade climática da precipitação e temperatura são fatores importantes a serem considerados no manejo de povoamentos florestais no Brasil. À medida que as temperaturas aumentam e os padrões de precipitação mudam, haverá necessidade de cultivar genótipos resistentes à seca em terras atualmente produtivas. Prevê-se que a probabilidade de stress hídrico aumente devido aos aumentos previstos nas temperaturas do ar à superfície e às reduções nas precipitações nas regiões tropicais, conforme indicado pelo Painel Intergovernamental sobre alterações climáticas (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2018).

Entre as espécies arbóreas mais importantes, as do gênero *Eucalyptus* foram àquelas que apresentaram o maior aumento desde sua introdução (meados de 1825), (EMBRAPA, 2019). A obtenção de altas taxas de crescimento depende da utilização de resultados derivados de iniciativas de pesquisa focadas em constante seleção de genótipos resistentes (Alfenas *et al.*, 2012), bem como da implementação de técnicas silviculturais, como preparação do local, fertilização, espaçamento e manejo de ervas daninhas, se tornando crucial para garantir a viabilidade das florestas (Gonçalves *et al.*, 2013). O crescimento das florestas plantadas de eucalipto é significativamente impactado pelo clima. Um estudo realizado na Bahia observou um gradiente de 100 km onde a precipitação dobrou de 800 mm ano⁻¹ para 1.600 mm ano⁻¹. Este aumento na precipitação resultou num aumento de três vezes no crescimento da madeira, com a biomassa aumentando de 10 Mg ha⁻¹ Ano⁻¹ para 30 Mg ha⁻¹ Ano⁻¹ (Stape *et al.*, 2004). Descobriu-se que a aplicação de irrigação adicional em locais específicos aumenta significativamente o crescimento da madeira, resultando num aumento que varia de 20% a 80% (Stape *et al.*, 2008; Ryan *et al.*, 2010).

No contexto do manejo intensivo de plantações de eucalipto, é importante notar que diferentes genótipos apresentam variações significativas nas suas taxas de consumo de água, na eficiência da produção de madeira em relação à transpiração da água e nas suas respostas a eventos de seca (Hubbard *et al.*, 2010; Blackman *et al.*, 2017). A implementação de práticas silviculturais também pode ser significativa, especificamente através da redução da densidade de árvores por hectare como forma de mitigar a mortalidade resultante de condições de seca (Hakamada *et al.*, 2017).

As recomendações para o manejo silvicultural da talhadia derivam de pesquisa

e desenvolvimento conduzidos há várias décadas, numa época em que os rendimentos eram aproximadamente metade das taxas atuais (Simões *et al.*, 1972; Balloni e Silva, 1978; Camargo *et al.*, 1997; Ferrari *et al.*, 2004; Hakamada *et al.*, 2015a).

As perspectivas futuras de sustentar ou melhorar as atuais taxas de crescimento dependerão de uma série de modificações futuras. Segundo Stape (2008), as flutuações na precipitação anual têm o potencial de ter um impacto significativo na produção primária bruta e na produção de madeira, com reduções potenciais que variam entre um terço e metade. Além disso, é razoável esperar que quaisquer modificações nos padrões climáticos a nível regional levariam, portanto, a alterações correspondentes nos níveis de produção naquela região. A utilização de modelos estatísticos e ecofisiológicos que integram a precipitação como variável é uma prática prevalente na previsão do crescimento (Hubbard *et al.*, 2010). Além disso, o desenvolvimento contínuo de abordagens silviculturais adaptadas às condições específicas do local, conforme destacado por Gonçalves (2017), desempenhou um papel significativo no aumento da produtividade.

A seleção da quantidade de estocagem é um aspecto crucial na determinação do tamanho das árvores e do crescimento geral do povoamento nas florestas plantadas, conforme destacado por Harrington e Reukema (1983) entre os vários atos silviculturais. A alocação de carbono em vários componentes vegetais é influenciada por mecanismos de armazenamento (Rodrigues *et al.*, 2021), bem como por fatores associados às propriedades da madeira (Roth *et al.*, 2007). O impacto global do armazenamento no crescimento abrange vários fatores, tais como a sua influência na utilização de recursos, particularmente em relação à luz e à água, bem como o seu efeito na eficácia da alocação de recursos para a produção de madeira (Akers *et al.*, 2013; White *et al.*, 2014).

Entretanto, a necessidade de obter estimativas mais precisas também surge como um imperativo para o planejamento silvicultural a médio e longo prazo. A incerteza climática, a disponibilidade de recursos e as condições de mercado são variáveis complexas que afetam diretamente a silvicultura. O presente estudo justifica-se pela necessidade de pesquisas que descrevam acúmulo de biomassa do *Eucalyptus* em função do manejo de talhadia e alto fuste na região do litoral norte da Bahia, fornecendo informações sobre a dinâmica de crescimento de povoamentos florestais. Logo o primeiro capítulo consiste em uma análise abrangente, sobre a

importância da escolha correta do manejo para garantir uma melhor sustentabilidade, as necessidades de estimativas mais precisas e a oportunidade de inserção no mercado de carbono e o segundo capítulo possibilitará compreender e prever o crescimento em função do manejo a ser adotado após primeira rotação e caracterizar o melhor modelo de equações para estimar biomassa.

CAPÍTULO 1

EXPLORANDO A BIOMASSA DO COMPONENTE ARBÓREO EM SISTEMAS DE TALHADIA E ALTO FUSTE: UMA ANÁLISE ABRANGENTE

Resumo

A relação entre a biomassa e o estoque de carbono em ecossistemas florestais, incluindo plantações de eucalipto, é direta e fundamental. As árvores e florestas desempenham um papel crucial no sequestro de carbono atmosférico através do processo de fotossíntese, no qual absorvem dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e armazenam carbono em sua biomassa. O manejo florestal adequado, como o uso de práticas sustentáveis de alto fuste e talhadia, pode aumentar a quantidade de carbono armazenada nas florestas, ajudando assim na mitigação das mudanças climáticas. Em outras palavras, a biomassa é um indicador essencial para avaliar a quantidade de carbono armazenada por unidade de área. As plantas, em particular, têm um papel fundamental na absorção de dióxido de carbono da atmosfera com aproximadamente 415 partes por milhão (ppm) e armazenamento de carbono em sua biomassa corresponde a 50% de uma planta. Espécies de crescimento rápido, como o eucalipto, podem ser importantes para o sequestro de carbono em plantações, mas a relação entre a biomassa e o estoque de carbono depende de vários fatores. Para estimar a biomassa e quantificar o estoque de C orgânico em plantações florestais, há métodos que vão desde a análise destrutiva com o abate das árvores (métodos diretos) e não destrutiva (métodos indiretos). Essas medições são importantes para estimar o estoque de carbono, uma vez que a biomassa é um indicador direto do carbono armazenado. A relação entre biomassa aérea e radicular e estoque de carbono é influenciada por diversos fatores, incluindo o tipo de vegetação, a idade das plantas, as condições ambientais e os processos de decomposição.

Palavras-chave: ecossistemas; equações; carbono; condições climáticas.

Abstract

The relationship between biomass and carbon stock in forest ecosystems, including eucalyptus plantations, is direct and fundamental. Trees and forests play a crucial role in sequestering atmospheric carbon through the process of photosynthesis, in which

they absorb carbon dioxide (CO₂) from the atmosphere and store carbon in their biomass. Proper forest management, such as the use of sustainable high-stem and coppice practices, can increase the amount of carbon stored in forests, thus helping to mitigate climate change. In other words, biomass is an essential indicator for evaluating the amount of carbon stored per unit area. Plants play a key role in absorbing carbon dioxide from the atmosphere at approximately 415 parts per million (ppm) and carbon storage in their biomass accounts for 50% of a plant's. Fast-growing species, such as eucalyptus, can be important for carbon sequestration in plantations, but the relationship between biomass and carbon stock depends on several factors. To estimate biomass and quantify the stock of organic C in forestry plantations, there are methods that range from destructive analysis with the felling of trees (direct methods) and non-destructive (indirect methods). These measurements are important for estimating carbon stock, since biomass is a direct indicator of stored carbon. The relationship between aboveground and root biomass and carbon stock is influenced by several factors, including the type of vegetation, the age of the plants, environmental conditions and decomposition processes.

Keywords: ecosystems; equations; carbon; climate conditions.

1.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, são evidentes os imensos avanços no manejo de florestas plantadas em termos de aumento de produtividade e sustentabilidade, o que é atribuído ao avanço tecnológico, melhoramento genético, estoque de carbono, legislação e certificação ambiental, e interação entre a ciência, a sociedade e os tomadores de decisão públicos e privados (FAO, 2020). A produtividade média produzida pelo gênero aumentou de 10 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em 1970 para 38,9 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, em 2021 (IBÁ, 2022). A evolução em área plantada e produtividade é resultado de anos de pesquisas envolvendo diferentes materiais genéticos e sua interação com o ambiente e boas práticas de manejo onde também permitiram encurtar o tempo entre plantio e colheita (IBÁ, 2020).

A biomassa do componente arbóreo em sistemas de alto fuste e talhadia desempenha um papel fundamental em práticas de manejo florestal sustentável e na

gestão eficaz dos recursos naturais. Estes sistemas são estratégias utilizadas na silvicultura para otimizar a produção de madeira, melhorar a biodiversidade e conservar ecossistemas florestais. A biomassa arbórea é uma medida crucial nesse contexto, pois representa a quantidade de matéria orgânica armazenada nas árvores, o que inclui troncos, galhos e folhagem (Brown, 1997).

A biomassa é uma fonte significativa de carbono, desempenhando um papel importante na regulação do ciclo global do carbono e no combate às mudanças climáticas. Ao sequestrar dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera através da fotossíntese e armazená-lo na biomassa, as árvores contribuem para a redução das concentrações atmosféricas de CO₂, um dos principais gases de efeito estufa responsáveis pelo aquecimento global (Mello *et al.*, 2007).

O aumento dos estoques de carbono nos ecossistemas naturais, bem como a redução das emissões de gases de efeito estufa, são fundamentais para mitigar as mudanças climáticas. Isso envolve a proteção das florestas existentes, o reflorestamento e o manejo sustentável das terras, além da adoção de práticas agrícolas e industriais de baixa emissão de carbono. Essas ações ajudam a equilibrar o ciclo do carbono, entusiasmam as emissões e aumentam a capacidade de absorção de carbono pelos sumidouros naturais, confiantes para um clima mais estável e sustentável (Amado *et al.*, 2006).

Diante desse contexto diversos estudos vêm sendo adotados e alguns merece destaque, a quantificação da variável biomassa é um importante método para esse fim, pois ela é uma consequência direta de todos os fatores bióticos e abióticos de um ecossistema florestal. Como todos esses fatores estão inter-relacionados, é necessário estudá-los todos de uma vez para analisar as condições fitossanitárias de um ecossistema. Como resultado direto de todos os componentes bióticos e abióticos de um ecossistema florestal, a quantificação da variável biomassa é uma técnica importante para este fim (Brown, 1997).

Em resumo, a relação entre a melhor definição de manejo, estoque de carbono e modelos matemáticos é complexa e exige uma análise cuidadosa das práticas de manejo, dos impactos na biomassa e no carbono, e da utilização de modelos para prever e avaliar esses impactos ao longo do tempo.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Estoque de carbono

O setor florestal surge como uma das possibilidades de redução das concentrações de CO₂ na atmosfera, principalmente por meio da fixação de carbono (C) pelas plantas arbóreas. O principal clima tropical do Brasil e a grande extensão territorial, bem como a disponibilidade de mão-de-obra e tecnologia inovadora, levam a plantações florestais com altas taxas de crescimento vegetativo (Stape *et al.*, 2008). Em média, uma árvore de eucalipto tem 65% de seu C no tronco, 13% na copa e 22% nas raízes (Brasil, 2001). Percebe-se que mais da metade da energia de uma plantação vem do tronco, portanto, se você não contar a copa e as raízes ao descobrir C, o número real de C armazenado é menor do que deveria ser, mas como é difícil obter e mensurar o estoque de C nessas duas últimas partes, muitas vezes elas ficam de fora das estimativas do estoque total de C de galhos e folhas, essas partes podem ser estimadas como porcentagem da biomassa do tronco (Loza-Balbuena, 2001). Paixão (2006) constataram que as raízes representavam 21% da biomassa total em plantas de *E. grandis* com 6 anos de idade.

A coleta de dados para realizar o cálculo da biomassa e a quantidade de carbono, podem ser feitas por dois métodos os diretos e indiretos. Os métodos diretos envolvem o corte de árvores, como por exemplo a colheita da floresta ou amostras representativas, a pesagem da biomassa e a dendrometria onde mede o diâmetro, altura e volume das árvores para estimar sua biomassa usando equações específicas de biomassa para a espécie. E os métodos indiretos que através do sensoriamento remoto utiliza-se imagens de satélite, drones e outras tecnologias para estimar a biomassa com base em características como a densidade da copa, altura e cobertura vegetal e a modelagem que usa modelos matemáticos e estatísticos para estimar a biomassa com base em variáveis como diâmetro, altura e idade das árvores, como o modelo de Schumacher-Hall e o modelo de Spurr são exemplos comuns. (Brown *et al.*, 1986).

Em plantações florestais equiâneas colhidas e replantadas periodicamente, a deposição e o fluxo de C são descritos usando o modelo criado por (Dewar e Cannell 1992). Outros modelos contabilizam a vida útil do produto madeireiro e o tempo de rotação para maximizar a produção de biomassa florestal (Leles *et al.*, 1994). Junto

com esses dois, outros incluem aqueles criados por Schroeder (1992), Alvarez (1993), Flint e Richards (1994), Hoen e Solberg (1994), Delaney *et al.*, (1997), Ortiz (1997), Bashkin e Binkley (1998), Vélez e Arango (2001), Montagu *et al.*, (2005) e Sales *et al.*, (2006).

E para estimar a quantidade de biomassa e a proporção de carbono de uma planta, é utilizado as diretrizes e metodologias que através do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) fornece de forma detalhada calcular a biomassa em ecossistemas terrestres, especialmente em florestas e áreas de vegetação. Estes cálculos são usados para estimar o estoque de carbono em biomassa (IPCC, 2003), onde tem como exemplo o Fator de Eficiência de Biomassa (BEF) onde é usado para estimar a quantidade de biomassa aérea (geralmente, troncos, galhos e folhas) de uma floresta com base na medição de diâmetros das árvores. Ele relaciona a biomassa total de uma área florestal à área basal (área da seção transversal das árvores) e é usado para extrapolar estimativas de biomassa com base em amostragens limitadas. E a Razão de Carbono (R) que é uma medida que representa a proporção de carbono na biomassa de uma planta. É usado para converter estimativas de biomassa em estimativas de estoque de carbono. A Razão de Carbono varia entre diferentes tipos de vegetação e pode variar entre partes diferentes da planta (por exemplo, folhas, galhos, raízes) em resumo, o BEF ajuda a estimar a biomassa total de uma floresta com base em medições de diâmetros de árvores, enquanto a Razão de Carbono é usada para converter biomassa em estimativas de estoque de carbono, levando em consideração a proporção de carbono presente na biomassa da planta. (IPCC, 2001).

Para maximizar o retorno financeiro e, ao mesmo tempo, garantir uma base sustentável de estoque florestal, o manejo florestal moderno, que exige integração entre floresta, indústria e mercado, deve ser utilizado diante da possibilidade de utilização da floresta como mitigador de problemas ambientais (climáticos). Técnicas de identificação de possibilidades, aplicações alternativas e estimativas dos diversos produtos que as florestas podem fornecer devem ser criadas e utilizadas para isso (Leite, 1994).

O potencial de agregar valor às florestas plantadas por meio do desenvolvimento do "mercado de créditos de carbono" e ajudar a reduzir as emissões de CO₂ no meio ambiente apresenta possibilidades positivas de desenvolvimento para a indústria florestal brasileira em um mercado globalizado e altamente

competitivo. São poucos os trabalhos que demonstram o verdadeiro potencial das florestas neste mercado, ainda que a indústria florestal possa lucrar. Estimativas volumétricas de troncos de árvores, que são transformadas em biomassa e carbono, têm sido utilizadas para fundamentar diversos cálculos. Não existem muitos estudos que incluam estimativas precisas dos diversos compartimentos florestais (solo, raízes, copas, cobertura orgânica etc.), mas eles estão começando a ser feitos (Schumacher *et al.*, 2003; Waltzlawick *et al.*, 2002; Rezende, 2002; Caldeira *et al.*, 2002).

O estoque de carbono em plantações de eucalipto é influenciado por vários fatores, incluindo a idade das árvores, a densidade de plantio, as práticas de manejo e as condições ambientais. Geralmente, à medida que as árvores crescem e se desenvolvem, sua biomassa aumenta, o que resulta em um maior estoque de carbono (Lindner; Karjalainen, 2007). Além disso, a diversidade de espécies também pode influenciar o estoque de carbono, pois diferentes espécies de árvores têm taxas de crescimento e características de biomassa distintas. Florestas com alta diversidade podem ter uma distribuição mais equilibrada de biomassa e um estoque de carbono mais estável ao longo do tempo (Chave *et al.*, 2005).

A relação entre a biomassa e o estoque de carbono pode variar dependendo do ciclo de crescimento da planta. Durante os estágios iniciais de crescimento, a biomassa tende a aumentar rapidamente, resultando em um aumento significativo do estoque de carbono. Conforme as árvores atingem a maturidade, o crescimento da biomassa se estabiliza, e o estoque de carbono pode se manter relativamente estável (Higuchi, 2004).

A acumulação de carbono na fitomassa florestal e no solo, permite que ocorra a fixação de carbono, mas a quantidade de fixação desse carbono e varia de acordo com sua região, segundo os tipos de solos e manejos florestais (Miranda, 2008). De todo o carbono que um ecossistema florestal consegue sequestrar, 45 a 55% está na biomassa acima do solo (fuste, casca, galhos e folhas); 20 a 26% na biomassa abaixo solo (raízes); 20% no solo (respiração das raízes e respiração heterotrófica dos microrganismos edáficos) e 6 a 8% na serapilheira (Qureshi *et al.*, 2012), sendo que estes valores podem variar de acordo com o estágio de desenvolvimento da floresta (Cassol, 2013).

A crescente concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) gerou um maior foco na mitigação da sua expansão para mitigar potenciais repercussões no sistema climático da Terra. Embora o foco principal seja a redução da taxa de

emissões de dióxido de carbono (CO₂) resultante da utilização de combustíveis fósseis, há um reconhecimento crescente do potencial de mitigação destas emissões através da transferência de CO₂ da atmosfera para a biosfera terrestre (West *et al.*, 2002).

1.2.2 Manejo de talhadia e alto fuste

A talhadia e o alto fuste são os dois principais métodos silviculturais utilizados para o manejo de eucalipto. Segundo Stojanovi (2017), esses sistemas são opostos e impactam diretamente o uso da água pela planta. A capacidade das cepas de emitir brotações após o corte da floresta é uma das grandes vantagens das espécies do gênero *Eucalyptus spp.* O manejo de talhadia simples consiste na condução das brotações resultante do toco após o corte da floresta, constituiu-se prática comum na década de setenta e início de dos anos oitenta. O alto fuste abrange na formação do povoamento por meio de mudas, quando se opta pela troca do povoamento, após o corte da floresta, denomina-se alto fuste (Ribeiro *et al.*, 2002).

A habilidade em emitir brotos após a colheita é uma característica de grande importância silvicultural e econômico presente em algumas espécies do gênero. Essa característica permite que povoamentos com alto potencial de brotação sejam utilizados por mais tempo do que uma rotação (Barros *et al.*, 1997; Couto *et al.*, 1989). Nesse mecanismo, quanto mais rapidamente novos brotos forem emitidos, maior será a capacidade de rejuvenescimento do material genético. O potencial de brotação de espécies de *Eucalyptus spp.* pode, entretanto, ser influenciado por fatores genéticos, operacionais e ambientais (Stape, 1997).

O manejo de florestas de por meio de brotação tornou-se prática estabelecida em várias nações séculos atrás (FAO, 1981). Desde a introdução do gênero no início do século XX por Edmundo Navarro de Andrade, a talhadia simples é utilizada no Brasil, com ciclos de corte que variam de 6 a 10 anos, com o objetivo de produzir lenha (Andrade, 1961). As empresas começaram a explorar suas madeiras através da talhadia em meados da década de 1970 e início da década de 1980 devido à simplicidade de conduta e economia de custos associados ao preparo da área (Ferrari, Ferreira, Silva 2005).

Nas décadas de 1960 a 1980, a talhadia era considerada o sistema padrão

(Alves, 2015). Com o desenvolvimento de genótipos com produtividade e qualidade da madeira superior e o surgimento da silvicultura clonal, a reforma dos povoamentos passou a ser mais adotada, ocorrendo, inclusive, declínio das pesquisas sobre a talhadia. Em decorrência da crise econômica de 2008, as empresas florestais, com o objetivo de contenção de custos, reduziram seus programas de reforma e plantio de novas áreas, com a talhadia ganhando novo destaque. (ABRAF, 2013).

O uso da talhadia apresenta vantagens, pois apresenta taxa de crescimento inicial de brotações superior à de povoamentos de alto fuste, podendo resultar em antecipação da produtividade máxima. Isso ocorre na presença de um sistema radicular já estabelecido que facilita a absorção de água e nutrientes além das reservas presentes na cepa ou nas raízes (Cacau, 2008). Ademais, há redução de custos de cerca de 33% na formação, pois dispensa a produção de mudas, preparo de solo, plantio e reduz os tratamentos culturais requeridos no sistema de alto fuste. Sob aspectos ambientais, há redução de consumo de água e uso de fertilizantes, agrotóxicos e combustíveis fósseis, além da melhor conservação do solo (Camargo *et al.*, 1997; Chaves; Marrichi, 2015).

No entanto a produtividade florestal obtida na talhadia é extremamente variável, ocorrendo reduções de até 10% no momento do corte (Alves, 2015). O principal motivo que afeta o crescimento e, consecutivamente, a produtividade dos indivíduos é o índice de falhas por não rebrota das cepas (Gonçalves *et al.*, 2014).

Quando a alternativa mais adequada é sistema de alto-fuste ou reforma, após o corte raso da floresta, existe uma série de fatores que concorrem para essa situação. Pode ser realizado a troca de material genético que é geralmente plantado, na entrelinha do plantio antigo, porém o fator que fortemente conduz à decisão de reformar a floresta é a produtividade. Por sua vez a reforma de um povoamento florestal consiste na substituição de talhões de potencial produtivo muito baixo por um novo povoamento originado do plantio de mudas com potencial produtivo superior (Simões *et al.*, 1981).

O manejo da talhadia vem evoluindo desde a crise econômica de 2008, quando empresas que buscavam diminuir os gastos com o preparo da área optaram pelo sistema como forma de manejo de suas matas. A evolução dos territórios manejados por essa técnica foi visível ainda em 2009, quando as estatísticas referentes às terras pertencentes aos empreendimentos vinculados à ABRAF (2013) apontaram um aumento das áreas cultivadas por talhadia de 5% para 25% entre 2008 e 2009. Em

2013, o sistema de talhadia foi utilizado para manejar cerca de 300 mil hectares (23%) de plantios de eucalipto pertencentes a empresas filiadas ao PTSM (Programa Temático de Silvicultura e Manejo - IPEF).

Até meados de 2014, muitas plantações de talhadia, com tempos de produção variando de 6 a 8 anos, situavam-se em áreas com limitações hídricas e nutricionais variadas. A composição genética e o grau de estresse ambiental impactaram no incremento médio anual para essas condições, que variou entre 40 e 45 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (Gonçalves *et al.*, 2014a).

Reformar um povoamento ou conduzir as brotações é uma das decisões mais importantes nas empresas florestais. É influenciada pela disponibilidade de terras para o plantio, mudanças no objetivo final da floresta, poucas falhas, avanço tecnológico e, principalmente, por critérios econômicos, cujo custo da reforma pode ser até 6 vezes mais caro que o da condução por talhadia (Rezende *et al.*, 2005).

Essa abordagem de manejo silvicultural é considerada economicamente viável e sustentável, oferecendo benefícios econômicos e ambientais. O manejo da brotação elimina a necessidade de preparo do solo, e a necessidade de fertilizantes e controle de ervas daninhas é reduzida em um sistema de talhadia. Dessa forma, o custo de realização da renovação do povoamento representa entre 60% e 75% do custo da reforma em sistema de caule alto. Segundo Rode (2015), entre as disparidades observadas nos custos gerados em cada sistema de manejo, destacam-se os insumos (formicidas, herbicidas e fertilizantes) e os gastos associados à implantação/condução do assentamento.

Ao se realizar a reforma de uma floresta, o novo plantio é feito nas entrelinhas do cultivo anterior. Com isso, praticamente, dobra-se o número de tocos na mesma área, as brotações se tornam um problema em razão da competição desleal, sendo necessário realizar controle das brotações do plantio anterior, promovendo desenvolvimento do novo plantio. O rápido crescimento inicial dos brotos, provocado pelo sistema radicular pré-estabelecido da talhadia, é uma das principais vantagens da talhadia em relação ao alto fuste. Nesta situação, o sistema radicular serve como fonte de reservas orgânicas e minerais que podem ser translouçadas e usadas novamente para a formação de novas raízes e brotos. Entretanto em povoamentos de alto fuste as mudas investem tanto no desenvolvimento de seus sistemas radiculares, destinados à absorção de água e nutrientes, quanto no crescimento de sua parte de área (Barros; Teixeira; Teixeira, 1997).

Reis e Reis (1997) afirmam que as práticas de manejo utilizadas, bem como os fatores ambientais, estão ligadas à variação comportamental entre plantas da mesma espécie. Assim, além da qualidade do material genético, o tipo de manejo utilizado afeta tanto o potencial de renovação quanto o crescimento inicial das mudas de eucalipto no campo. Em termos de genética, entende-se que a fisiologia do crescimento das espécies do gênero pode variar dentro e entre os ciclos de rotação (Couto; Bastos; Lacerda 1989) e que um mesmo material genético apresenta variação na capacidade de crescimento quando submetido a várias condições ambientais e de manejo.

Os eventos climáticos extremos são cada vez mais frequentes, o que pode levar a tendências e oscilações nos aumentos médios anuais da temperatura do ar, diminuição da precipitação total anual e alterações na sua distribuição em algumas áreas e déficits hídricos severos e duradouros (Alvares; Sentelhas; Chou 2021). Gonçalves (2017) afirmam que as pressões ambientais reduzem a produtividade das florestas. A adaptabilidade dos genótipos a condições extremas de estresse e mudanças climáticas é uma das maiores dificuldades enfrentadas pela silvicultura atualmente.

1.2.3 Modelo clássico x Modelagem integrada

Os estudos de biomassa florestal são conduzidos com uma variedade de objetivos, incluindo a medição da ciclagem de nutrientes, quantificação por motivos de energia e como base para informações para pesquisa de sequestro de carbono. Esses estudos são fundamentais para a tomada de decisão no manejo dos recursos florestais (Pascoa *et al.*, 2004). O interesse em aproveitar plenamente a árvore (raízes, tronco, galhos), aproveitar os resíduos da fabricação de produtos florestais, quantificar o material combustível em relação ao potencial de incêndio da floresta e outras abordagens aumenta a importância dos estudos de biomassa (Husch; Miller; Beers 1982).

Guedes (2001) afirmam que a biomassa (kg m^{-2}) é um indicador de produtividade ($\text{kg m}^{-2} \text{ano}^{-1}$) de um sítio, variando com a precipitação, a temperatura, a latitude e a altitude. Produtividade e energia podem não ter relação entre si e variam de acordo com o estado de sucessão das plantas em questão. Por exemplo, uma

floresta madura com muita biomassa pode não ser muito produtiva.

Além de influenciar o reservatório global de carbono, a quantidade e a distribuição da biomassa florestal podem ser usadas para prever mudanças climáticas futuras (Sedjo, 1989; Dixon *et al.*, 1994). Compreender o intenso debate em torno da contribuição das árvores para o ciclo do carbono requer uma estimativa precisa da biomassa florestal e seu padrão de mudança ao longo do tempo (Sedjo, 1989; Fan *et al.*, 1998; Brown; Schroeder; Kern 1999).

Ketterings *et al.*, (2001) afirmam que o cálculo da biomassa acima do solo é crucial para a pesquisa sobre o balanço global de carbono. De acordo com Higuchi (1998), as estimativas de biomassa representam um importante indicador para monitorar e avaliar a exportação de nutrientes após a extração, a fim de reduzir os efeitos ambientais negativos causados por essa atividade.

Os métodos existentes para estimar a biomassa em áreas florestais dependem principalmente de dados de inventários florestais, que são então transformados nessas estimativas usando fatores e equações de biomassa (Somogyi *et al.*, 2006). Para uma estimativa precisa da biomassa, normalmente é necessária uma amostragem destrutiva. Normalmente, a biomassa de uma árvore é calculada a partir de suas partes. Dependendo do tipo de suporte e dos resultados desejados, esses componentes são separados e especificados de forma diferente. Essa variação pode conter ou excluir alguns elementos particulares, como flores e frutos, ou especificar outros, como raízes e galhos, dividindo-os em raízes finas e raízes profundas, e galhos com diversas idades e espessuras (Campos, 1991).

Os estudos para quantificar a biomassa florestal dividem-se em métodos diretos (também conhecidos como determinação) e métodos indiretos (também conhecidos como estimativas), conforme Higuchi e Carvalho Júnior (1994). A determinação refere-se a uma medição precisa que é feita diretamente na biomassa, como a pesagem de um fuste inteiro em uma balança ou dinamômetro. Para extrapolar a avaliação amostral para toda a área de interesse, todas as árvores de uma determinada parcela são derrubadas e pesadas. A técnica indireta de estimar a biomassa acima do solo envolve associá-la a uma variável simples de coletar e que não exige a destruição de material vegetal. Correlações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões de dados de inventários florestais (DAP, altura e volume), por meio de dados de sensoriamento remoto (fotos de satélite) ou usando um banco de dados em um sistema de informações geográficas (GIS), podem ser usadas para

fazer estimativas.

Sanquetta (2002) diz que existem dois tipos principais de métodos de amostragem direta de biomassa: o método de árvore individual e o método de parcela. Sanquetta (2002) cita Pardé (1980), que diz que o método da árvore individual é feito pela escolha de uma árvore "média". Para descobrir que árvore é essa, preciso fazer um levantamento florestal piloto e descobrir o diâmetro ou a área da seção transversal dessa árvore. Após um inventário florestal experimental para descobrir como os diâmetros das árvores são distribuídos, um determinado número de árvores será cortado para cada faixa de diâmetros, que abrangerá todas as classes da floresta.

Existem duas maneiras de realizar avaliações indiretas de biomassa quando se trabalha no campo, de acordo com Somogyi (2006): usa-se dados de volume de árvores ou povoamentos e multiplica-se pelo fator ou fatores apropriados, conhecidos como fatores de biomassa (BF), que convertem (expandem ou reduzem) estimativas de volume para estimativas de biomassa. A correção da equação baseada em regressão é um outro método de estimativa indireta de biomassa. O método mais típico, de acordo com Koehler, Watzlawick e Kirchner (2002), envolve a amostragem de algumas árvores, determinando o peso de cada componente e correlacionando esses resultados usando variáveis dendrométricas.

A adoção de modelos não lineares produz estimativas mais precisas do que os lineares, uma vez que a maioria das ocorrências naturais costuma ser não linear (Santos, 1996). O crescimento de uma única árvore e, posteriormente, o crescimento da floresta, que apresenta uma tendência não linear e sigmoideal, são indicadores da utilização de modelos não lineares no manejo florestal (Regazzi; Leite 1993). Existem também modelos não lineares flexíveis e confiáveis para esse tipo de análise.

Brown (1997) afirma que o uso de equações de regressão é mais vantajoso porque as estimativas de biomassa podem ser obtidas sem ter que calcular a variável de volume, mas isso tem a desvantagem de que os dados para todas as classes de diâmetro normalmente não estão disponíveis porque a maioria dos inventários florestais se concentra apenas na parte comercial de uma floresta, onde normalmente eram medidos diâmetros de 10 cm ou mais, ignorando as árvores menores, que podem representar até 5% da biomassa total da floresta. Para árvores com DAP mínimo de 10 cm, é necessário calcular o fator de expansão (BEF), que é obtido dividindo-se a biomassa seca total acima do solo pela biomassa seca do volume inventariado ou comercial, segundo Brown, Gillespie e Lugo (1989).

De acordo com Houghton (1994), é importante levar em consideração árvores menores, vegetação rasteira e vegetação viva subterrânea (raízes) ao avaliar a biomassa. Inserir qualquer vegetação morta em pé ou caída, incluindo acima e abaixo do solo. Santos (1996) diz que um grande banco de dados é necessário para melhorar as estimativas de crescimento da floresta tropical. Acredita-se que as estimativas de biomassa com base em inventários de volume florestal são melhores do que aquelas baseadas na biomassa total acima do solo. Isso ocorre porque os dados de volume de inventários florestais são mais comuns e geralmente são coletados em grandes áreas de amostragem usando um método de amostragem planejada que visa representar a população de interesse.

Segundo Couto e Vettorazzo (1999), um dos objetivos primordiais dos inventários florestais é a aquisição de estimativas de volume ou massa, para os quais modelos matemáticos ou equações de volume ou massa, comercial ou total, são amplamente utilizados e normalmente possuem os seguintes funcionais: forma: $Y = f(d, h)$, onde Y é o volume individual da árvore (v) ou massa (m), d é o dap e h é a altura total da árvore. É possível estimar o volume ou a massa de um povoamento florestal com base em um método de amostragem e nessas equações de volume e massa (SPURR, 1952; VEIGA, 1981) que servem para estimar o volume e a massa individual das árvores. Segundo Crow e Schlaegel (1988), as variáveis mais utilizadas nas equações de biomassa são o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total, que muitas vezes podem ser combinadas para produzir a variável (DAP2H).

De acordo com Higuchi (1998), modelos de equações alométricas com apenas uma variável independente (dap) produziram resultados tão confiáveis quanto os de modelos que também incluíram a altura (h). Santos (1996) afirma que, devido às informações adicionais oferecidas pelo conhecimento da altura, uma equação de biomassa que leve em conta tanto o diâmetro quanto a altura devem produzir estimativas mais precisas do que uma equação de biomassa que usa apenas o diâmetro.

A maioria das estimativas para a biomassa viva acima do solo é construída usando medições do diâmetro, altura e densidade da madeira do dossel da floresta. Adicionalmente, é importante compreender as várias fitofisionomias hoje em uso, bem como a organização espacial das várias manchas estruturais de vegetação, como as clareiras. Essas diferenças estão relacionadas aos vários tipos de solo, à disponibilidade de nutrientes, ao clima, ao regime de perturbação, ao estágio do ciclo

sucessório, à localização topográfica e ao uso histórico da terra (Clark; Clark, 2000). A esse respeito, Crow e Schlaegel (1988) afirmam que a maioria das equações de regressão para biomassa são criadas para locais específicos e não devem ser aplicadas em outros lugares. Chave (2005) citam as principais variáveis preditoras utilizadas nos estudos de biomassa, em ordem decrescente de importância: diâmetro do tronco, densidade da madeira, altura total e tipo florestal

Para estimar o total ou por componente de uma árvore (tronco, galhos, folhagem), vários modelos de regressão têm sido utilizados. Segundo Crow e Schlaegel (1988), as equações de biomassa podem assumir várias formas, sendo as mais comuns lineares e não lineares. A escolha de uma dessas formas é baseada na experiência de uso, na relação entre as variáveis ou em uma recomendação da literatura.

Parresol (1999) afirma que os dados de biomassa exibem tipicamente heterocedasticidade, o que significa que a variância do erro não é constante em todas as observações. Enquanto o modelo não linear (erro aditivo) usa técnicas iterativas para estimativa de parâmetros, o modelo linear pode ser alterado usando o método dos mínimos quadrados. Normalmente, uma transformação logarítmica é usada para converter o modelo não linear de erro multiplicativo em um modelo linear. Depois disso, os parâmetros são estimados usando mínimos quadrados e, quando o modelo é transformado em logaritmo, a variância do erro normalmente permanece constante (homoscedasticidade).

Cunia (1986) afirma que as funções lineares têm algumas vantagens sobre as não lineares ao escolher entre elas para estimar a biomassa. Como os mínimos quadrados são uma técnica estatística relativamente conhecida e muita teoria estatística foi desenvolvida para funções lineares, seu uso é direto e pode ser expandido para incluir somas das funções de biomassa para cada componente de uma árvore. Outro benefício notável é a facilidade com que o erro amostral do inventário pode ser combinado com o erro da função de regressão linear. A principal desvantagem da função linear é que ela não pode ser usada com dados fora do intervalo de amostragem, mas a função não linear pode ser usada nessa área.

Segundo Cunia (1986), ao usar funções de regressão para estimar a biomassa, é importante considerar os erros que são incorporados nessas estimativas. Segundo esse autor, tais erros surgem, por exemplo, durante a seleção das árvores amostrais e coleta de dados, que, quando realizadas em ocasiões diferentes, podem gerar

ajustes com resultados diferentes; por medições das mesmas amostras tomadas em diferentes ocasiões por diferentes equipes; empregando diferentes modelos de regressão no mesmo conjunto de dados; empregando o mesmo modelo de regressão para múltiplas populações florestais.

Para a seleção dos melhores modelos, podem ser adotados os seguintes critérios, segundo Couto (1977), Draper; Smith (1981), Ahrens (1983), Campos; Trevizol Júnior; Paula Neto (1985) e Montgomery; Peck (1982):

- a) exame do quadro da análise de variância (SQR), soma de quadrados dos resíduos, quadrado médio dos resíduos (QMR), teste “F” para o modelo completo e teste “F” seqüencial;
- b) análise das medidas de precisão: coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa ou erro padrão residual (S_{yx}) e erro padrão da estimativa expresso como uma porcentagem da média aritmética da variável dependente ($S_{yx}\%$), sendo, neste caso, interpretado de forma análoga ao coeficiente de variação;
- c) distribuição gráfica dos valores residuais;
- d) exame das estimativas dos parâmetros da equação pelo teste t.

Ao comparar modelos para estimativas de biomassa, Schlaegel (1982), citado por Crown; Schlaegel (1988) aconselha levar em consideração uma série de estatísticas, incluindo R^2 (coeficiente de determinação), S_e (erro padrão da estimativa), CV (coeficiente de variação), I (Índice Furnival), S(%) (erro padrão em percentual) e P_e (erro percentual), que representa a diferença proporcional em percentual entre a massa estimada e a massa real.

1.3 CONCLUSÃO

Compreender a relação entre a biomassa e o estoque de carbono é uma medida estratégica que contribui para a conservação ambiental, a mitigação das mudanças climáticas, a proteção da biodiversidade e a promoção de práticas econômicas sustentáveis. É uma abordagem que leva em consideração não apenas os impactos imediatos, mas também os benefícios a longo prazo. Florestas saudáveis continuam a capturar carbono da atmosfera através da fotossíntese e o armazenam em biomassa e solo. O manejo adequado permite que esse processo de captura de carbono continue contribuindo para a remoção líquida de CO_2 da atmosfera.

Entender a distribuição da biomassa entre as partes aéreas e radiculares das plantas é importante para compreender a dinâmica do ciclo do carbono em ecossistemas. Além de um o cálculo preciso da biomassa aérea e radicular desempenha um papel fundamental na gestão e conservação dos ecossistemas naturais e na avaliação do impacto das atividades humanas sobre o estoque de carbono. Ele fornece informações críticas para tomadas de decisão em relação à conservação, manejo sustentável e políticas ambientais.

REFERÊNCIAS

- ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário Estatístico da ABRAF: ano base 2012. Brasília, 2013. 142 p.
- ALBAUGH, T. J. Tamm Review: Light use efficiency and carbon storage in nutrient and water experiments on major forest plantation species. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v. 376, p. 333-342, 2016.
- ALVAREZ, E. Composición florística diversidad, estructura y biomasa de un bosque inundable em la Amazonia colombiana. 1993. 143f. **Tesis** (Mestrado em Biologia) - Universidad de Antioquia, 1993.
- ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P.C. ; CHOU, S. C. Future climate projections in South America and their influence on forest plantations. 1. ed. Piracicaba: IPEF - **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, 2021. 96p.
- ALVES, E, G. Análise comparativa da colheita florestal em regime de Reforma e talhadia. – 2015. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, 2015.
- AHRENS, S. Importância da distribuição de resíduos de regressão na seleção de equações de volume. *Silvicultura*, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 609-614, 1983.
- AMADO, T. J. C. et al. Potential of Carbon Accumulation in No-Till Soils with Intensive Use and Cover Crops in Southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, n. 35, p. 1599-1607, 2006.
- ANDRADE, E.N. O eucalipto. São Paulo: **Typografia Brasil Rothschild**, 2.ed, 1961, 660 p.
- BARROS, N.F.; TEIXEIRA, P.C.; TEIXEIRA, J.L. Nutrição e produtividade de povoamentos de eucalipto manejados por talhadia. **Série Técnica IPEF**, v.11, n. 30, p. 79-88, 1997
- BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTWILL, P.M. & ADAMS, M.A., eds. **Nutrition of eucalypts**. Australia, SCIRO, 1996. p. 335-355.
- BASHKIN, M. A.; BINKLEY, D. Changes in soil carbon following afforestation in Hawaii. **Ecology**, v.79, n.3, p.828-833, 1998.
- BOYDEN, S.; BINKLEY, D.; STAPE, J. L. Competition among Eucalyptus trees depends on genetic variation and resource supply. **Ecology**, v. 89, n.10, p.2850-2859, 2008.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. Estimativa da quantidade de carbono fixado pelas florestas plantadas. 2001.
- BROWN, S.; LUGO, A. E.; CHAPMAN, J. Biomass of tropical tree plantations and its

implication for the global carbon budget. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 13, p. 390-394, 1986.

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

BROWN, S.; LUGO, A. E. **Biomass estimates moist forest the Brazilian Amazon**. 2.ed. [S.l.: s.n.], 1990. 25 p.

BROWN, S.; IVERSON, L. R. Biomass estimates for tropical forests. **World Resources Review**, [S.l.], n. 4, p. 366-384, 1992.

BROWN, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. Rome: **FAO**, 1997. 55 p.

BROWN, S. L.; SCHOEDER, P.; KERN, J. S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 123, n. 1-3, p. 81-90, 1999.

CALDEIRA, M.V.W; SCHUMACHER, VM; BARICHELLO, L.R.; VOGEL, H.L. Determinação de Carbono Orgânico em Povoamentos de Acácia eurnsii de Selvagem. Plantados não Rio Grande do Sul. Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais Voeu. 1, n.2, pág. 47-54, 2003.

CAMPOS, J. C. C.; TREVIZOL JÚNIOR, T. L.; PAULA NETO, F. de. Ainda, sobre a seleção de equações de volume. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 9, n. 2, p. 115-126, 1985.

CAMPOS, M. A. A. Balanço de biomassa e nutrientes em povoamentos de *Ilex paraguariensis*. Avaliação na safra e na safrinha. 106 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

CACAU, F. V. et al. Decepa de plantas jovens de eucalipto e manejo de brotações, em sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1457-1465, 2008.

CAMARGO, F. R. A.; SILVA, C. R.; STAPE, J. L. Resultados experimentais da fase de emissão de brotação em *Eucalyptus* manejado por talhadia. **Série técnica IPEF**, v.11, n.30, p.115-122, 1997

CAMPOE, O. C. MUNHOZ, J. S.B.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; DE MATTOS, E. M.; FERREZ, A. P. C.; STAPE, J. L. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v.380, p. 149-160, 2016.

CAMPOE, O. Ecologia da produção e da competição intraespecífica do *Eucalyptus grandis* ao longo de um gradiente de produtividade no Estado de São Paulo. 121f. **Tese** (Doutorado em Recursos Florestais), Universidade de São Paulo, Piracicaba,

2012.

CASSOL, H. L. G. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila mista com uso de dados ópticos de sensores remotos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIMS, M.A.; CHAMBERS, J.Q. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, v. 145, p. 87- 99, 2005.

CHAVES, R. A.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; PEZZOPANE, J. E. M.; XAVIER, A.; MONTE, M. A. Dinâmica de cobertura de dossel de povoamentos de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden submetidos a desrama artificial e desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 989-998, 2007.

CHAVES, R.; MARRICHI, A. H. C. Manejo de talhadia (2ª Rotação) na Duratex. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, vv. 21, n. 42, 2015.

CLARK, D. B.; CLARK, D. A. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 137, n. 1-3, p. 185-198, 2000.

COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M.; LACERDA, J. S. Comparação de dois modelos de prognose de madeira de *Eucalyptus* para alto fuste e talhadia. Piracicaba: **IPEF**, n.41/42, p.27-35, 1989.

COUTO, H. T. Z. do. Tabelas de volume para brotação de touças de *Eucalyptus saligna* Sm. **IPEF**, Piracicaba, n. 15, p. 117-121, 1977.

COUTO, H. T. Z. do; VETTORAZZO, S. S. Seleção de equações de volume e peso seco comercial para *Pinus taeda*. *Cerne*, Lavras, M. G., v. 5, n. 1, p. 69-80, 1999.

CROW, T. R.; SCHLAEGEL, B. E. A guide to using regression equations for estimating tree biomass. **Northern Journal of Applied Forestry**, United States, v. 5, n. 1, Mar., 1988.

CUNIA, T. R. Construction of tree biomass tables by linear regression techniques. In: Estimating tree biomass regression and their error. Broomall: USDA. Forest Service, 1986. p. 27-36. Proceedings of the Workshop on tree biomass regression functions and their contribution to the error of forest inventory estimates. (**General Technical Report NE-117**).

DELANEY, M. et al. The distribution of organic carbon in major components of Forests located in five life zones of Venezuela. **Journal of Tropical Ecology**, v.13, n.5, p.697-708, 1997.

DEWAR, R.C; CANNEL, M.G.R. Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples. **Tree Physiology**, Victoria, v. 11, p. 49-71, 1992.

DIXON, RK, *Mudanças Climáticas* 27 : 71 (1994).

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied Regression Analysis**. 2 ed. New York: J. Wiley & Sons, 1981. 709 p.

ECOAR - Instituto Ecoar para Cidadania. **Efeito estufa**. São Paulo, 2003. 5p.

EMBRAPA. O eucalipto. <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto>. Acesso em: 2 abr. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (**Embrapa-CNPS**. Documentos, 1)

FAO. Eucalypts for planting. **Forestry Series**, 11, Roma, 1981. 677 p.

FAN, S.; GLOOR M.; MAHLMAN, J.; PACALA, S.; SARMIENTO, J.; TAKAHASHI, T. A large terrestrial carbon sink in north America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide models. **Science**, Washington, DC, n. 282, p. 386-387, 1998.

FERRARI, M.P.; FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D. Condução de Plantios de *Eucalyptus* em sistema de talhadia. Colombo: **Embrapa Florestas**. 28p, 2004.

FLINT, E. P.; RICHARDS, J. F. Trends in carbon content of vegetation in South and Southeast Asia associated with changes in land use. In: DALE, V. H. (Ed.) Effects of land-use changes on atmospheric concentrations. South and Southeast Asia as a case study. New York: **Springer-Verlag**, 1994. p.201-299.

GATTO, A. Estoques de carbono no solo e na biomassa de plantações de eucalipto na Região Centro-Leste de Minas Gerais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 159p. (**Tese** de Doutorado).

GONÇALVES, J.L.M. Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1994. 84p. (**Tese** de Livre Docência)

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; BEHLING, M.; ALVES, J.M.; PIZZI, G.T.; ANGELI, A. Produtividade de plantações de eucalipto manejadas nos sistemas de alto fuste e talhadia, em função de fatores edafoclimáticos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 411-419, 2014a.

GUEDES, B.; ARGOLA, J.; PUNÁ, N; MICHONGA, E.; MONTEIRO, J. Estudo da biomassa florestal numa floresta aberta de miombo no distrito de Bárué, Manica. Moçambique: Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, 2001. pt. 2. Relatório das actividades. 2001.

HAKAMADA, R.E., LEMOS, C.C.Z., SILVA, R.M.L., BATISTUZZO, G., FONSECA, J., GABRIEL, J., ALMEIDA, A., 2015. Primeiro relato do efeito do espaçamento de plantio na sobrevivência e crescimento de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* em solo arenoso na região. Centro Norte do Tocantins. **Serie Técnica IPEF** 20, 36–41.

HAKAMADA, R.E., BATISTUZZO, G., LEMOS, C.C., MEULMAN SILVA, R., ALMEIDA, A.C., 2015a. Uso do inventário florestal para identificação de fatores silviculturais e ambientais que afetam a produtividade de *Eucalyptus* manejado sob talhadia. **Sér. Téc. IPEF** 21, 1–80.

HAKAMADA, R., HUBBARD, R.M., FERRAZ, S., STAPE, J.L., LEMOS, C., 2017. Biomass production and potential water stress increase with planting density in four highly productive clonal *Eucalyptus* genotypes. *South. For.: J. For. Sci.* 10.2989/20702620.2016.1256041.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 125-145.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação de floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 28, p. 153-165, 1998.

HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; PINTO, A. C. M.; SILVA, R. M.; TRIBUZY, E. S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 295-304, set./dez., 2004.

HOEN, H.; SOLBERG, B. Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. **Forest Science**, v.3, n.2, p.429-451, 1994.

HOUGHTON, R. A.; SCHLESINGER, W. H.; BROW, S.; RICHARDS, J. F. Carbon dioxide exchange between atmosphere and terrestrial ecosystems. In: TRABALKA, JOHN, R. (Ed.). *Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle*. Washington, DC: U.S. **Department of Energy**, 1985. p. 114-140. (DOE/ER-0239).

HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CURD, 1994. p. 38-76.

HOUGHTON R. A. Land use change and carbon cycle. *Global Change Biology*, **Oxford**. Disponível em: . Acesso em: 17/07/2005.

HUSCH, B.; MILLER, C. L.; BEERS, T. E. Forest mensuration. 3 ed. New York: J. **Wiley & Sons**, 1982. 397p.

IBÁ 2020. Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores - ano base 2019, São Paulo.

IBÁ 2021. Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores - ano base 2020, São Paulo.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Climate Change 2001: The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report. Cambridge Univ. Press. 2001.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Climate Change 2003.

KETTERINGS, Q. M.; COE, R.; NOORDWIJK, M. van.; AMBAGAU, Y.; PALM, C. A. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 146, p. 199-209, 2001.

KOCH, P. Estimates by species group and region in the USA of: I. Below-group root weight as a percentage of oven-dry complete-tree weight; and II. In: **CARBON** content of tree portions: consulting report. [S.l.: s.n.], 1989. 23 p.

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. et al. (Eds.). As florestas e o carbono. Curitiba: [S.l.: s.n.], 2002. p. 251-264.

LEITE, H.G. **Conversão de tronco em multiprodutos de madeira, utilizando programação dinâmica**. 1994. 230f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

LELES, P.S dos S.; REIS, G.G. dos; REIS, M. das G.F.; MORAES, E.J. Relações Hídricas e crescimento de árvores de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita* sob diferentes espaçamentos na região do cerrado. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 41-50, 1998.

LINDNER, M.; KARJALAINEN, T. Carbon inventory methods and carbon mitigation potentials of forests in Europe: a short review of recent progress. **Europe Journal Forest Research**. [S.l.], v. 126, p. 149-156, 2007.

LOZA-BALBUENA, I. Impacts carbon trading in afforestation projects in Uruguay. 2001. 121f. Tesis (Mestrado em Ciência Ambiental) - **University of Canterbury**, New Zealand, 2001.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M.; GAVA, J. L. Pre- and post-harvest root growth in *Eucalyptus grandis* stands installed in sandy and loamy soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 246, p. 186-195, 2007.

MIRANDA, D.L.C. **Modelos matemáticos de estoque de biomassa e carbono em áreas de restauração florestal no Sudoeste Paulista**. Dissertação de mestrado. Curitiba, 2008.

MONTAGU, K. D. et al. Developing general allometric relationship for regional estimates of carbon sequestration - an example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites. **Forest Ecology Management**, v.204, n.1, p.113-127, 2005.

NEVES, J.C.L. Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo. Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual Norte Fluminense, 2000. 191p. (**Tese de Doutorado**)

MARTINELLI, L. A. et al. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais. SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, Rio De Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CURD, 1994, p. 197-221.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. 2.ed. New York: J. Wiley & Sons, 1992. 527 p.

OTTO, M. S. G. HUBBARD, R. M.; BINKLEY, D.; STAPE, J. L. Dominant clonal *Eucalyptus grandis x urophylla* trees use water more efficiently. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v. 328, p. 117-121, 2014.

ORTIZ, R. **Costa Rican secondary forest: an economic option for joint implementation initiatives to reduce atmospheric CO₂**. Draft paper presented for inclusion in the Beijer Seminar in Punta Leona. Costa Rica: 1997. 19p.

PAIXÃO, F. A. et al. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, v.30, n.3, p.411-420, 2006.

PARDÉ, J. Forest Biomass. Forestry Abstract Review Article. [S.l.], v. 41, n. 8, p. 343-362. 1980.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, Lawrence, v. 45, n. 4, p. i-r, 1999.

PÁSCOA, F.; MARTINS, F.; GONZÁLES, R. S.; JOAO, C. Estabelecimento simultâneo de equações de biomassa para o pinheiro bravo. In: SIMPÓSIO IBEROAMERICANO DE GESTIÓN Y ECONOMÍA FORESTAL, 2., Barcelona. p. i-f, 2004.s

QURESHI, A. et al. A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes. *Environmental Science, Police*. v. 16. p. 81-89, 2012.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing, v. 3.3. Vienna, 2014. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 08 set. 2016.

REGAZZI, A. J.; LEITE, H. G. Análise de regressão: teoria e aplicações em manejo florestal. Viçosa, MG: UFV/DEF/SIF, 1993. 232 p. Apostila.

REIS, M.G.F.; REIS, G.G.; VALENTE, O.F. & FERNANDES, H.A.C. Sequestro e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO₂, 1., Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro, Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p.157-195.

REIS, G. G. DOS; REIS, M. DAS G. F. Fisiologia da brotação de eucalipto com ênfase nas suas relações hídricas. **Série Técnica IPEF**, v. 11, n. 30, p. 9–22, 1997.

REZENDE, A.V. Diversidade, estrutura, dinâmica e prognose do crescimento de um cerrado sensu stricto submetido a diferentes distúrbios por desmatamento. 2002. 243p. **Tese** (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

REZENDE, M.F.; CRUZ, F.F. in Atas do V Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências (Bauru, 2005). **Editado pela ABRAPEC** - R. Nardi e O. Borges.

RIBEIRO, N.; SIOTE, A. A.; GUEDES, B. S.; STAISS, C. Manual de silvicultura tropical. Maputo: Universidade Eduardo Mondlane; **FAO**, 125 p, 2002.

RODE, R., LEITE, H. G., OLIVEIRA, M. L. R., BINOTI, D. H. B., RIBEIRO, C. A. A. S., SOUZA, A. L., SILVA, M. L., & COSENZA, D. N. Comparação da regulação florestal de projetos de fomento com áreas próprias de empresas florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 35(81), 11-19, 2015.

SALES, M. H. et al. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: a case study for Rondonia, Brazil. **Ecological Modelling**, v.205, n. 1/2, p.221-230, 2007.

SANQUETTA, C. R. et al. Ecuaciones de biomassa aérea y subterrânea em plantaciones de Pinus taeda em el sur del estado do Paraná, Brasil. In: SIPÓSIO INTERNACIONAL MEDICIÓN Y MONITOREO DE LA CAPTURA DE CARBONO EM ECOSISTEMAS FORESTALES, VALDIVIA: 1 CD-ROM. p. 1-11. (Documentos, 2001).

SANTOS, J. DOS. Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira. 121 f. **Tese** (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG., 1996.

SEDJO, RA, *Aquecimento com efeito de estufa: redução e adaptação* : 105 (1989)

SEDJO, R. A. Temperature Forest ecosystem in the global carbon cycle. *Ambio*, Stockholm, v. 21, p. 274-277, 1992.

SCHLAEGEL, B. E. 1982. **Testing, reporting, and using biomass estimation models**. p. 95–112 in Proc. 1981 southern forest biomass workshop.

SIMÕES, J. W et al. Formação, manejo e exploração de florestas com espécies de rápido crescimento. Brasília: **IBDF**, 131 p, 1981.

SMITH, J. E.; HEATH, L. H.; WOODBURY, P. B. How to estimate forest carbon for

large areas from inventory data. **Journal of Forestry**. Washington, DC, p. 25-31, Jul./Aug., 2004.

STAPE, J.L. Planejamento global e normatização de procedimentos operacionais da talhadia simples em *Eucalyptus*. **Série Técnica IPEF**, v.11, n.30, p. 51-62, 1997.

STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G., 2004. *Eucalyptus* production and the supply, use and the efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **For. Ecol. Manage.** 193, 17–31.

STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G., 2008. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **For. Ecol. Manage.** 255, 920–930.

STOJANOVIĆ, M.; SZATNIEWSKA, J.; KYSELOVÁ, I.; POKORNÝ, R.; ČATER, M. Transpiration and water potential of young *Quercus petraea* (M.) Liebl. coppice sprouts and seedlings during favourable and drought conditions. **Journal of Forest Science**. 63, 313–323, 2017 <https://doi.org/10.17221/36/2017-JFS>.

SCHUMACHER, M.V. & WITSCHORECK, R. Inventário de carbono em povoamentos de *Eucalyptus* spp. nas propriedades fumageiras do sul do Brasil: "Um estudo de caso". In: SANQUETTA, C.R.; BALBINOT, R. & ZILLOTTO, M.A.B., eds. Fixação de carbono: Atualidades, projetos e pesquisas. Curitiba, **AM Impresses**, 2004. p.111-124.

SCHROEDER, Carde; MAEVE, M. Katherine. Nursing care partner ships at the Denver nursing project in human caring: An application and extension of caring theory in practice. **Advances in Nursing Science**. Germantown, v.15, n.2, p.25-38. Dec. 1992.

SOMOGYI, Z. et al. Indirect methods of large forest biomass estimation. **European Journal of Forest Research**, Berlin, v. 126, n. 2, p. 197-207, 2006.

SPURR, S.H. **Forest inventory**. New York: Ronald, 1952, 476 p.

SCHUMACHER MV, BRUN EJ, RODRIGUES LM, SANTOS EV. Retorno de nutrientes via deposição de serapilheira em um povoamento de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Estado do Rio Grande do Sul. **Árvore** 2003; 27:791-798.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D. & RYAN, M.G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of the use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **For. Ecol. Manag.**, 193:17-31, 2004.

TURNER, J. & LAMBERT, M. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. **For. Ecol. Manag.**, 133:231-247, 2000.

VEIGA, R. A. de A. Uso de equações de volume em levantamentos florestais. In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 1981. p. 93-102.

VÉLEZ, V. H. G.; ARANGO, G. J. L. Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL MEDICIÓN Y MONITOREO DEL LA CAPTURA DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES. Valdivia: 2001. 18p.

WATZLAWICK, L. F. et al. Ecuaciones de biomassa aérea em plantaciones de Araucaria angustifolia em el sur del estado do Paraná, Brasil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL MEDICION Y MONITOREO DE LA CAPTURA DE CARBONO EM ECOSISTEMAS FORESTALES, VALDIVIA: 1 CD-ROM. p. 1-11. (Documentos, 2001).

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHUMACHER, M. V. O papel do sensoriamento remoto nos estudos de carbono. In: SANQUETA, C. R. et al. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s.n.], 2002. p. 215-235.

WEST, T.O., MARLAND, G.A., 2002. Synthesis of carbon sequestration, carbon emissions and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. **Agric. Ecosyst. Environ.** 91, 217–232.

CAPÍTULO 2

BIOMASSA DOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE ÁRVORES DE EUCALIPTO SOB MANEJO DA TALHADIA E ALTO FUSTE

Resumo

Embora a alocação de clones de eucalipto represente um desafio, a consideração da alta produtividade durante a primeira rotação emerge como um dos principais critérios na determinação do manejo florestal subsequente. A capacidade das cepas de emitir brotações é conhecida, mas a difícil decisão sobre adoção de alto fuste ou talhadia motivam novas pesquisas. O presente estudo tem como objetivo avaliar o crescimento e biomassa de plantios de *Eucalyptus urophylla*, aos dois, três, quatro e cinco anos de idade sob manejo de talhadia e alto fuste e realizar o ajuste simultâneo de equações dos compartimentos da biomassa florestal, a fim de estimar a biomassa dos diferentes compartimentos da árvore, ou seja, a biomassa de folhas, fuste, galhos e raízes em ambos os sistemas de manejo. A performance do manejo foi avaliada em oito locais com características edafoclimáticas semelhantes, onde amostras destrutivas da parte aérea de 80 árvores foram coletadas. Cada árvore foi cortada ao nível do solo e dividida em três partes (tronco, folhas e galhos) para determinação da biomassa seca. A biomassa de raízes contou com amostragem de 16 raízes grossas. O manejo de talhadia mostrou-se superior ao de alto fuste em todas as idades analisadas, com acúmulo de biomassa cerca de 19% maior aos de cinco anos de idade. A aplicação das equações alométricas simultaneamente calibradas não apenas melhora a estimativa da biomassa armazenado na floresta ($R^2 > 0.5$), mas também aprimora a avaliação da produção de outros subprodutos além da madeira seja no manejo do alto fuste ou talhadia.

Palavras-chave: Modelagem florestal; Técnicas de manejo; Crescimento de árvores; Segunda rotação.

Abstract

Although the allocation of eucalyptus clones represents a challenge, considering high productivity during the first rotation emerges as one of the main criteria in determining subsequent forest management. While the ability of strains to

sprout is known, the difficult decision regarding the adoption of high forest or coppice motivates further research. This study aims to evaluate the growth and biomass of *Eucalyptus urophylla* plantations at two, three, four, and five years of age under coppice and high forest management and to simultaneously adjust equations for the compartments of forest biomass to estimate the biomass of different tree compartments, namely, leaf, stem, branches, and roots in both management systems. The management performance was assessed at eight sites with similar edaphoclimatic characteristics, where destructive samples of the aboveground part of 80 trees were collected. Each tree was cut at ground level and divided into three parts (stem, leaves, and branches) for dry biomass determination. Root biomass was sampled from 16 coarse roots. Coppice management proved superior to high forest management at all ages analyzed, with biomass accumulation approximately 19% higher at five years of age. The application of simultaneously calibrated allometric equations not only improves the estimation of biomass stored in the forest ($R^2 > 0.5$) but also enhances the assessment of the production of other byproducts besides wood, whether in high forest or coppice management.

Keywords: Forest modeling; Management techniques; Tree growth; Second rotation.

2.1 INTRODUÇÃO

As plantações de eucalipto desempenham um papel significativo na produtividade florestal do Brasil, representando mais de 80% do total de florestas plantadas no país (Pimenta *et al.*, 2018). Além disso, o Brasil possui a maior produtividade (32.7 m³/ha/ano) e a menor rotação de cultivo do mundo (< 6.7 anos), contribuindo de maneira expressiva para a produção de madeira, celulose e papel (IBÁ, 2023). Estudos conduzidos por Stape (2010) afirmam que fatores como clima, solo, espécie, manejo, genética, espaçamento e densidade influenciam a produtividade das plantações de eucalipto no Brasil. O clima favorável do país, proporciona condições ideais para o rápido crescimento ao longo do ano. Além disso, o manejo florestal adequado e a genética das mudas desempenham papéis determinantes para o sucesso das plantações ao incluir práticas de fertilização e controle de pragas, são ações essenciais para maximizar a produtividade das

plantações (Gonçalves *et al.*, 2013).

Diferentes técnicas de manejo podem ser utilizadas para cultivar florestas, sendo os sistemas de alto fuste e talhadia os mais comuns e eficazes (Ribeiro *et al.*, 2002). No alto fuste, a implantação de novos plantios ocorre a partir de mudas seminais ou clonais. Por outro lado, a talhadia consiste na formação de novos povoamentos através da condução da brotação após o corte raso da floresta (Mello *et al.*, 2007). Para compreender completamente o potencial produtivo dessas plantações, é essencial considerar não apenas o volume total de madeira produzido, mas também a distribuição da biomassa nas diferentes partes das árvores.

A biomassa das árvores de eucalipto é composta por diferentes componentes, incluindo lenho, caule, folhas, galhos e raízes. Estudos realizados por Gonçalves (2019) demonstraram que cada uma dessas partes possui características distintas em termos de densidade, composição química e potencial de aproveitamento. Enquanto o lenho e o caule são geralmente utilizados para a produção de madeira serrada, celulose e papel, as folhas e os galhos podem ser aproveitados para a produção de biomassa energética, óleos essenciais e outros produtos de alto valor agregado (Queiroz *et al.*, 2017). A relação entre a produtividade florestal e a biomassa das diferentes partes das árvores é complexa e multifacetada. Avanços tecnológicos também têm desempenhado um papel importante na melhoria da produtividade das plantações de eucalipto, como as equações de estimativa de biomassa que são desenvolvidas com base nas características das árvores, como diâmetro, altura, densidade e volume, e podem ser aplicadas em diferentes estágios de crescimento das florestas plantadas (Oliveira *et al.*, 2020). Com elas, é possível estimar a quantidade de madeira e biomassa produzida em uma determinada área e planejar a exploração de forma sustentável (Schröder *et al.*, 2013).

Embora as técnicas de estimativa de biomassa florestal por meio de imagens de satélite ou drones sejam cada vez mais frequentes e eficazes, a amostragem destrutiva continua sendo uma etapa fundamental para a validação desses modelos. Isso ocorre porque essas ferramentas de estimativa de biomassa florestal são baseadas em algoritmos e equações que levam em consideração diferentes variáveis, como diâmetros das árvores, altura da copa e densidade da vegetação, entre outras (Somogyi *et al.*, 2006). Neste caso, esses modelos precisam ser validados por dados empíricos, ou seja, por meio da amostragem destrutiva. Isso envolve a coleta de dados de campo por meio do corte e pesagem de árvores, galhos, folhas e raízes para

estimar a biomassa real da área florestal (Watzlawick *et al.*, 2009). Geralmente, o ajuste do modelo é realizado utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários ou o método dos mínimos quadrados generalizados. Após o ajuste do modelo, é necessário validá-lo utilizando dados de amostras independentes.

O ajuste simultâneo de equações dos compartimentos da biomassa florestal é crucial para o manejo florestal, permitindo uma estimativa precisa da biomassa total da floresta e de seus diferentes compartimentos, o que é essencial para a definição de estratégias de colheita e para a quantificação dos impactos ambientais e econômicos da atividade florestal (Parresol, 1999). Baseando-se nessas medições, equações matemáticas são desenvolvidas para relacionar a biomassa da árvore com variáveis de fácil mensuração de forma compartimentalizada (Ravindranath & Ostwald, 2008). Essas equações são ajustadas estatisticamente para garantir a precisão dos resultados e podem ser usadas para estimar a biomassa das árvores individuais (Ketterings *et al.*, 2001; Ribeiro *et al.*, 2011).

Diante das técnicas mencionadas, o ajuste simultâneo de equações dos compartimentos da biomassa florestal emerge como uma ferramenta crucial para estimar a biomassa de diferentes partes da árvore de forma conjunta, considerando a inter-relação entre elas. Essa abordagem, facilitada pelo modelo de regressão multivariada, permite uma modelagem mais precisa dos dados de biomassa de diferentes compartimentos, utilizando uma matriz de correlação que conecta esses elementos. Portanto, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de quantificar a biomassa total do *Eucalyptus urophylla* em diferentes diâmetros ao longo das idades no sistema de alto fuste e talhadia, além de realizar o ajustamento simultâneo das equações para os quatro componentes (galhos, folhas, fuste e raízes), bem como da equação para a biomassa total. Essas análises foram conduzidas em ambos os manejos na região do litoral norte baiano, contribuindo para uma compreensão mais abrangente e precisa da produtividade florestal.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área de estudo e delineamento experimental

O estudo foi realizado em povoamentos comerciais situados no litoral norte da

Bahia e no Agreste baiano, conforme detalhado na Tabela 1. A região possui um clima tropical úmido (Af), de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado por invernos chuvosos e verões secos. O relevo é classificado como ondulado a forte ondulado, com uma temperatura média anual variando entre 25°C e 27°C e uma precipitação média entre 1100mm e 1300mm. Os locais de amostragem destrutiva estão localizados nas proximidades do município de Entre Rios (BA/Brasil), distribuídos entre quatro sítios conduzidos por alto fuste e quatro sítios por talhadia, como ilustrado na Figura 1.

Os talhões foram selecionados levando em consideração diversos fatores, como precipitação, tipo de solo, idade das árvores, práticas de manejo e material genético.

Tabela 1 - Mapa de calor com (A) temperatura média (°C), (B) precipitação (mm) e (C) déficit hídrico mensal da área estudada e os 6 anos que o estudo ocorreu, no município de Entre Rios – Bahia

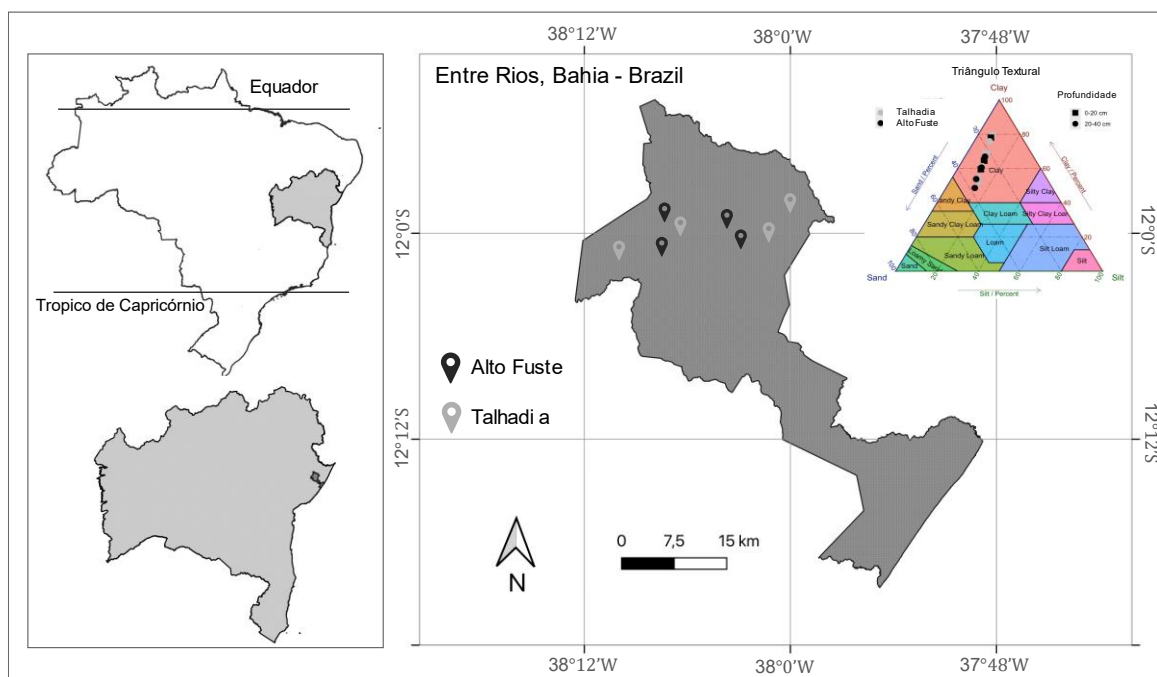
Mês/Ano	2016	2017	2018	2019	2020	2021	(A) T. Média(°C)
Jan	27.2	26.6	30.9	25.6	26.1	25.1	21
Fev	27.2	26.8	26.7	27.2	26.4	25.9	23
Mar	27.7	26.7	27.1	26.4	26.2	25.0	25
Abr	27.0	26.4	26.5	25.7	25.6	25.1	27
Mai	26.0	23.4	24.1	24.5	24.3	23.3	29
Jun	25.1	24.2	24.0	22.6	23.3	22.5	31
Jul	24.4	22.8	24.2	22.0	22.1	22.0	
Ago	23.3	23.0	22.8	21.8	22.1	21.7	
Set	23.7	22.9	23.3	22.8	22.8	23.5	
Out	26.3	25.9	25.1	23.7	24.8	25.1	
Nov	26.5	27.1	25.4	25.1	25.0	25.2	
Dez	26.9	27.8	26.2	25.5	25.1	25.5	

Mês/Ano	2016	2017	2018	2019	2020	2021	(B) PPT (mm)						
Jan	167	9	23	22	91	57	<table border="1"> <tr><td>9</td></tr> <tr><td>40</td></tr> <tr><td>70</td></tr> <tr><td>120</td></tr> <tr><td>200</td></tr> <tr><td>360</td></tr> </table>	9	40	70	120	200	360
9													
40													
70													
120													
200													
360													
Fev	44	28	37	23	71	20							
Mar	36	76	68	119	223	28							
Abr	82	118	161	119	185	198							
Mai	178	152	159	92	360	122							
Jun	161	149	146	226	157	126							
Jul	146	147	48	159	188	250							
Ago	108	63	56	107	111	97							
Set	90	141	23	104	79	54							
Out	64	41	55	64	58	61							
Nov	40	38	62	66	89	189							
Dez	48	83	45	43	21	138							

Mês/Ano	2016	2017	2018	2019	2020	2021	(C) DH(mm)						
Jan	36,7	114,8	120,4	85	65,2	43,9	<table border="1"> <tr><td>0,2</td></tr> <tr><td>15</td></tr> <tr><td>46</td></tr> <tr><td>71</td></tr> <tr><td>100</td></tr> <tr><td>120</td></tr> </table>	0,2	15	46	71	100	120
0,2													
15													
46													
71													
100													
120													
Fev	36,6	100,2	92,6	102,5	53,8	49,6							
Mar	68,1	81,2	83,2	90,8	15,8	70							
Abr	64,2	43,1	44,5	68,9	7,3	26,6							
Mai	33,7	15,6	12,9	45,9	0,7	3,4							
Jun	7,2	5,4	0,2	1,4	0,4	1,4							
Jul	6,4	4,2	7,5	1,2	0,5	0,2							
Ago	12,3	16	23,4	4,1	4,7	2,1							
Set	28,4	2,1	41,4	8,5	11,8	16,6							
Out	55,1	47,7	66,1	13,4	47,3	36,4							
Nov	93,5	100,2	64,7	53,9	39,3	5,2							
Dez	90	104,8	38,5	68,6	45,8	0,2							

As condições climáticas registradas no ano de 2016 a 2021, período de implantação das áreas analisadas teve uma variação considerável ao longo dos anos, o maior valor registrado de temperatura média foi no mês de janeiro em 2018, alcançando uma temperatura de 30.9°C.

Figura 1 - Localização das unidades experimentais no estado (Bahia) e cidade (Entre Rios) situados no Litoral Norte baiano



O genótipo estudado foi o *Eucalyptus urophylla*, onde os tratamentos compreendem dois sistemas (talhadia e alto fuste), com idades de 2, 3, 4 e 5 anos (Tabela 2). Para cada idade possui os dois manejos nas mesmas condições climáticas. O experimento foi instalado em delineamento casualizado, com parcelas retangulares de seis linhas por 6 plantas em espaçamento de 9 m², com quatro repetições em cada um dos oito sítios foi avaliado 144 árvores.

Tabela 2 – Localização dos tratamentos de *Eucalyptus urophylla*, com manejo, data de plantio e idade

Manejo	Data de plantio	Idade	Longitude	Latitude
Alto Fuste	22/05/2019	2	-38.178464	-11.978575
Talhadia	31/07/2019	2	-38.176209	-11.984212
Alto Fuste	16/02/2018	3	-38.206153	-11.996614
Talhadia	15/04/2018	3	-38.258438	-12.017927
Alto Fuste	22/02/2017	4	-38.109699	-11.977681
Talhadia	19/04/2017	4	-38.109074	-11.98958
Alto Fuste	22/01/2016	5	-38.111454	-11.974081
Talhadia	30/04/2016	5	-38.001776	-11.979395

Figura 2 – Etapas de coleta de dados (A) Inventário florestal, (B) Cubagem rigorosa, (C) Biomassa aérea de pesagem de galho, (D) Biomassa aérea de pesagem de lenho, (E) Discos separados por seções e (F) Biomassa de raízes



2.2.2 Crescimento das árvores e cubagem rigorosa

Os inventários florestais das áreas analisadas totalizaram 1.152 árvores referente ao total de 8 tratamentos. Foi realizado a medição da altura do peito (CAP, 1,30m acima do solo), altura total (Ht) e altura do início da copa para todas as árvores da parcela. Para realizar a coleta desses dados foram utilizados a fita métrica para medições do diâmetro (DAP) e o clinômetro florestal para calcular a altura das árvores. Esses dados foram processados e selecionados dez classes diamétricas onde representava a amplitude para cada tratamento, assim ao todo foram selecionadas 80 árvores para a amostragem destrutiva.

O volume foi obtido através da cubagem rigorosa e após a derrubada as árvores

foram fracionadas com divisão em seis partes iguais, sendo elas: Base, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% com diâmetro mínimo correspondente a 4 cm (Figura 3). Para a obtenção do volume real de cada indivíduo, a cubagem rigorosa do tronco e dos galhos foi realizada pela aplicação sucessiva da expressão de Smalian (Husch *et al.*, 1972), em secções de comprimentos variáveis ao longo do tronco.

Figura 3 – Ilustração da localização onde a árvore foi fracionada



Em cada uma das parcelas de amostragem, o diâmetro à altura do peito (1,3 m acima do nível do solo) (D) e a altura total da árvore (H) para todas as árvores foram registradas. As árvores selecionadas foram derrubadas a 0,1 m acima do nível do solo e foram desgalhadas ao longo de todo o comprimento do caule. Além disso, em cada árvore o diâmetro ao longo de todo o caule foi medido. Depois disso em cada divisão acima foram cortados dois discos (3 cm de espessura) para determinar a densidade básica do fuste.

2.2.3 Amostragem destrutiva de biomassa aérea e radicular

O ajuste de equações de biomassa realizado através do pacote R (nls e lm), onde os inputs foram através da amostragem destrutiva de biomassa em oito sítios. A biomassa aérea das árvores seccionadas ao nível do solo e fracionadas em três partes (tronco com casca, folhas e galhos) e foram obtidas separadamente utilizando-se balança com capacidade máxima de 150 kg. De cada seção foram amostras de aproximadamente 300 g para determinação da densidade básica e teor de umidade e dois discos do fuste.

O peso úmido das amostras de galho, folha e fuste verde foi obtido ainda no campo com o uso de balança de precisão mínima de 10 g. Amostras de 0,3 kg de galhos e folhas, foram levadas ao laboratório para determinação do teor de umidade,

e precisaram ser acondicionadas em sacos de papel, secas em estufa de circulação e renovação de ar (65°C) até massa ficar constante para determinação do teor de umidade. O peso seco dos galhos e folhas por árvore foram calculados multiplicando o peso úmido por relações entre peso seco e peso úmido determinadas em laboratório por meio de amostragem. O peso seco de cada seção do caule com casca foi calculado considerando o peso verde e a relação média entre peso seco e peso úmido de discos amostrados na extremidade grande e pequena de cada seção. A biomassa de cada árvore foi calculada pela soma do peso seco de todas as seções do caule. A razão de peso seco (DWR) foi determinada em laboratório pela secagem dos componentes da biomassa em estufa a 105°C por 24 h ou até peso constante alcançado (ASTM, 2019).

Para biomassa radicular foi realizado coletas de raízes grossas (maiores que 2mm de diâmetro) e raízes finas através de escavações manuais e com auxílio de talha manual. Foram amostrados 16 tocos de raízes, sendo quatro no manejo de alto fuste e quatro na talhadia com 2 anos de idade e mais quatro em cada manejo, porém com idade de 5 anos. Foram retiradas amostras deste material para determinação do peso úmido e peso seco em laboratório, para estimativa do peso seco total. As amostras foram moídas em moinho de lâminas do tipo Willey seguindo os métodos descritos por Tedesco (1995) e Miyazawa (1999).

A obtenção do volume total para todos os modelos, tanto para os volumes observados quanto os estimados, se deu pelo somatório dos volumes parciais de todas as seções utilizando-se a fórmula de Smalian, que pode ser explicado pelas seguintes fórmulas:

$$g_i = \frac{\pi DAP^2}{40000} \quad (\text{Eq1}) \quad v_j = \frac{(g_i + g_{i+1})}{2} L_j \quad (\text{Eq 2}) \quad vt = \sum_{j=1}^n v_j \quad (\text{Eq3})$$

em que: g_i = área seccional de cada extremidade (m^2) da seção ; v_j = volume da jésima seção, sendo o índice i relativo às áreas seccionais extremas do seção; L_j = o comprimento da j-ésima seção e vt = volume total.

2.3.4 Análise e validação dos modelos

O software R foi utilizado para realizar as calibrações dos modelos. Inicialmente, modelos lineares (equações transformadas em log) e posteriormente

modelos de regressão não linear foram usados para encontrar valores iniciais apropriados para cada modelo. As funções não segmentadas de Demaerschalk (1972) e Ormerod (1973) foram ajustadas inicialmente para estimar valores volumétricos. Cada busca de parâmetro utilizou 0,1 como valor inicial para cada coeficiente. As funções restantes (Kozak et al., 1969; Kozak, 2004) foram ajustadas inicialmente com coeficientes previamente ajustados por Môra, 2015. A avaliação da precisão dos modelos foi realizada por meio de análise gráfica dos resíduos (%), para verificar possíveis erros sistemáticos, utilizando o erro quadrático médio (RMSE %), o coeficiente de determinação R^2 (%), análise gráfica dos dados previstos e observados, e introduzimos uma estrutura de variância-covariância atribuindo diferentes pesos para previsões com intervalos variáveis.

Crítérios estatísticos obtidos a partir dos resíduos também foram examinados, a saber: viés (V), que é uma medida de quão distantes, em média, os resultados de um estimador estão do valor verdadeiro. Um estimador é considerado não tendencioso quando, em média, produz estimativas que estão próximas do valor verdadeiro do parâmetro, e erro quadrático médio (RMSE).

Essas estatísticas são descritas abaixo:

$$\text{Resíduo (\%)} = \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} 100 \quad (\text{Eq4})$$

$$R^2(\%) = 1 - \frac{\sum_i n(Y_i - \hat{Y})^2}{\sum_i n(Y_i - \bar{Y})^2} 100 \quad (\text{Eq5})$$

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \quad (\text{Eq6})$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_i n(\hat{y}_i - y_i)^2/n - 1}}{\sum_i n \hat{y}_i/n} 100 \quad (\text{Eq7})$$

em que y_i , \hat{y}_i e \bar{y}_i , são respectivamente os valores observados, os valores preditos e a média dos valores das variáveis dependentes; n é o total de observações usados no ajuste; $d_i = Y_i - \hat{Y}_i$; e p é o número de coeficientes do modelo.

Para as estimativas dos compartimentos da biomassa foram ajustadas oito

equações para o povoamento de *E. urophylla*, sendo quatro para alto fuste e quatro para talhadia com os seguintes componentes da árvore: folhas, galhos, fustes e raízes. A biomassa total foi definida como o somatório da biomassa dos quatro componentes, tendo sido o sistema ajustado de forma simultânea com o método “nonlinear seemingly unrelated regressions” (NSUR) de forma a melhorar a eficiência dos estimadores. Os modelos testados têm a forma alométrica, sendo função do diâmetro com casca e sem casca cada um dos dois sistemas de manejo. Isto permitirá utilizar os sistemas de equações para o manejo de áreas de alto fuste e talhadia. E estabeleceu-se que os modelos a utilizar nos sistemas de equações incluíam apenas a variável volume.

A estimativa das biomassas foi obtida pelo uso da equação:

$$W_{biomas} = \beta_0 * V_t^{\beta_1} \quad (\text{Eq8})$$

Em que:

W = biomassas, em Kg
 β_0 e β_1 = parâmetros dos modelos
 V_t = volume total

Equações para Alto fuste e talhadia:

$$W_{folha} = \beta_0 * V_t^{\beta_2}$$

$$W_{galho} = \beta_0 * V_t^{\beta_3}$$

$$W_{fuste} = \beta_0 * V_t^{\beta_4}$$

$$W_{raíz} = \beta_0 * V_t^{\beta_5}$$

$$W_{total} = W_{folha} + W_{galho} + W_{fuste} + W_{raíz} \quad (\text{Eq9})$$

Onde: $\beta_2, \beta_3, \beta_4$ e β_5 significam os parâmetros obtidos neste estudo

Adicionalmente, os modelos ajustados foram comparados por meio do Critério de Informação de Akaike (AIC). O AIC é uma medida da qualidade relativa do ajuste (AKAIKE, 1974) e o Critério de Informação Bayesiano (BIC) sua determinação Schwarz (1978), tanto o AIC quanto o BIC aumentam conforme a soma dos quadrados dos erros aumenta. Desta forma, quanto menor o valor do AIC e BIC de um modelo, menor é sua discrepância geral estimada, sua distância relativa para os valores reais, e é considerado melhor modelo.

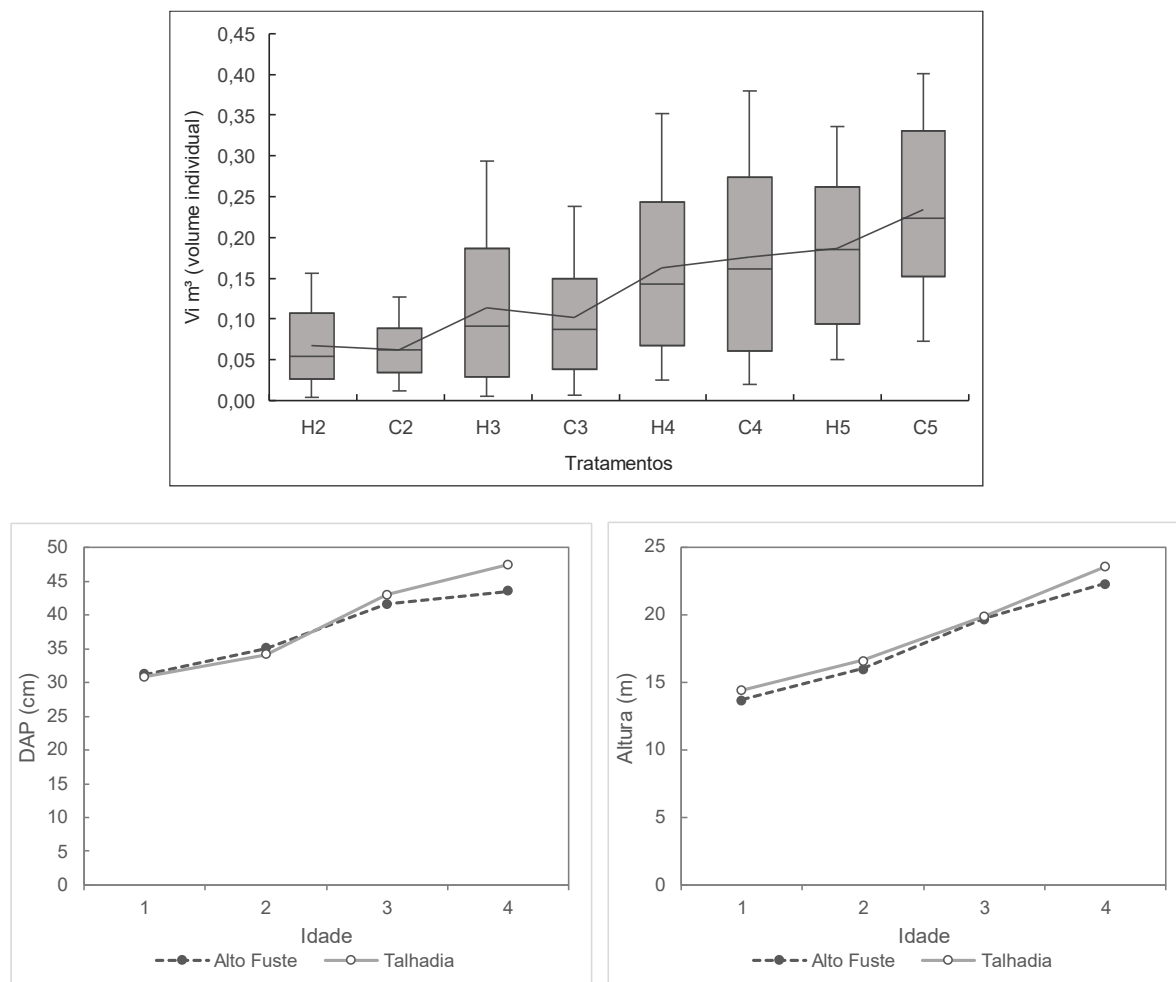
2.3 RESULTADOS

Na figura 4 é possível visualizar a amplitude do volume individual nos manejos de alto fuste (H) e talhadia (C), onde reflete não apenas a variedade de volumes em si, mas também as complexidades inerentes ao crescimento e manejo florestal em diferentes estágios de desenvolvimento das árvores. Ao considerar as idades de dois, três e quatro anos, observamos uma distribuição simétrica no manejo de talhadia, indicando uma relativa uniformidade nos volumes produzidos dentro dessas faixas etárias.

No entanto para o manejo de alto fuste uma distribuição simétrica positiva nas mesmas idades, sugerindo uma maior variabilidade nos volumes individuais das árvores. Nota-se que para a idade de cinco anos o manejo de talhadia apresenta maior amplitude dos valores quando comparado ao alto fuste, esse resultado sugere que, à medida que as árvores amadurecem e alcançam estágios mais avançados de crescimento, as variações nos volumes individuais podem se tornar mais pronunciadas, possivelmente devido a uma combinação de fatores, incluindo a competição intraespecífica e as interações complexas entre as árvores e o ambiente (Chaves *et al.*, 2007).

No gráfico B observa-se que no manejo de alto fuste o DAP médio das árvores tem um decréscimo nas idades de 4 e 5 anos quando comparado ao manejo de talhadia que tem uma ascendência, enquanto nas primeiras idades os valores médios estão próximos. E no gráfico de altura tende a ter valores similares nas idades de 2, 3 e 4 anos e aos 5 anos a talhadia se sobressai. No entanto, as parcelas sob manejo da talhadia aos cinco anos são capazes de alcançar maiores classes diamétricas, e o inverso ocorre aos três anos de idade. Conforme Saideles (2010), à medida que a floresta vai se desenvolvendo (passando das fases iniciais de crescimento que neste estudo é indicada pelas idades de 2 a 5 anos), ocorre uma gradual redução da biomassa da copa das árvores e simultaneamente verifica-se um aumento na proporção dos componentes de fuste.

Figura 4 –Volume individual (m³) de *Eucalyptus urophylla*, sob manejo de alto fuste (H) e talhadia (C) aos dois, três, quatro e cinco anos de idade no município de Entre Rios, Bahia

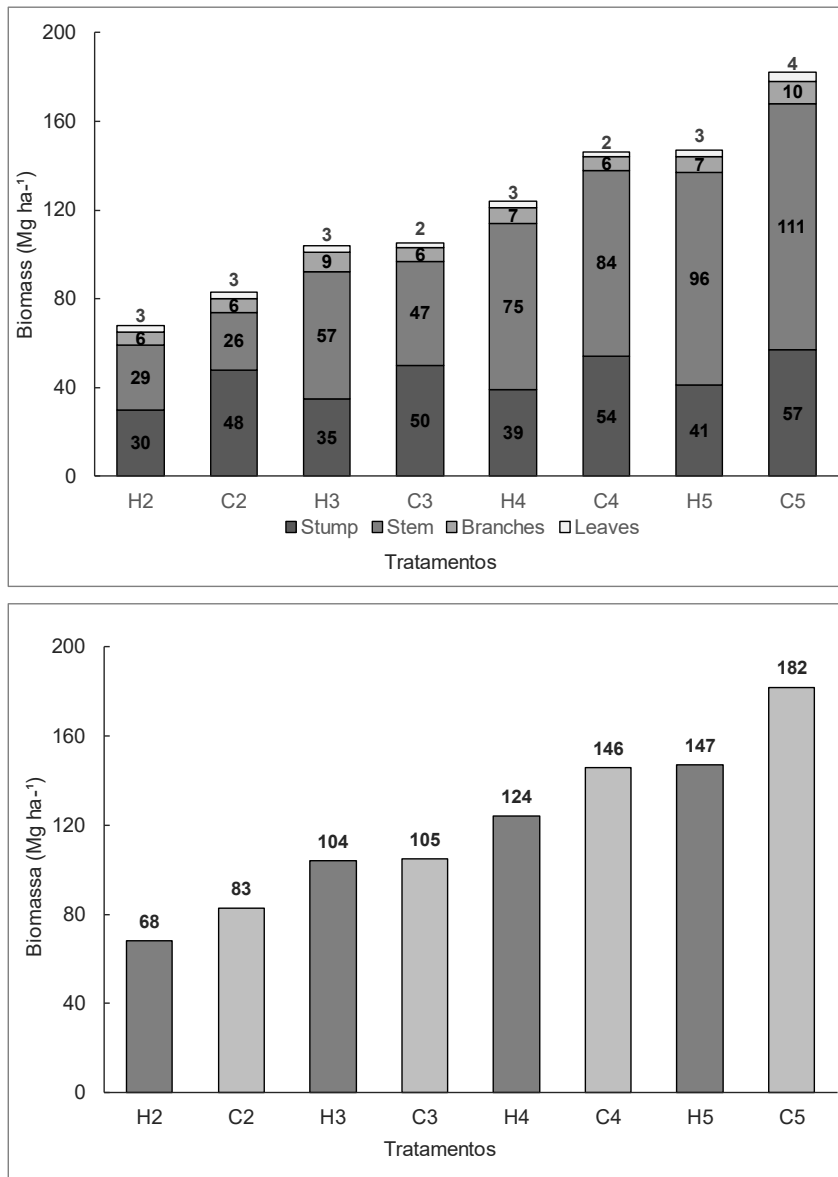


De acordo com King (2013) o monitoramento contínuo do diâmetro e volume das árvores ao longo do tempo pode fornecer uma visão sobre a dinâmica do crescimento e melhorar a compreensão dos impactos do manejo. Conforme Gonçalves e Stape (2002), o crescimento de um povoamento florestal homogêneo apresenta quatro diferentes estágios. O primeiro limita-se aos primeiros anos de idade (até 2 anos) e é correspondente ao crescimento inicial, sem competição por fatores de crescimento. O segundo (2 - 4 anos) corresponde à competição entre as árvores com segregação de classes diamétricas. O terceiro estágio (4 - 9 anos) é o momento que o dossel cobre toda a área e inicia-se a competição intraespecífica e o domínio das plantas daninhas. Por fim, o quarto estágio (após 9 anos) é o momento que se inicia o auto desbaste, com diminuição da área basal e possibilidade de formação de

clareiras.

Conforme Saideles (2010), à medida que a floresta se desenvolve (passando das fases iniciais de crescimento de dois a cinco anos de idade), ocorre uma gradual redução da biomassa da copa das árvores e simultaneamente verifica-se um aumento na proporção dos componentes de fuste.

Figura 5 - Acúmulo de biomassa ($Mg\ ha^{-1}$) de *Eucalyptus urophylla*, aos dois, três, quatro e cinco anos de idade, sob manejo de alto fuste (H) e talhadia (C) - (A). Acúmulo de biomassa nos compartimentos, Folha (Leaves), Galho (Branches), Fuste (Stem) e Raíz (Stump) para o manejo de alto fuste e talhadia no município de Entre Rios, Bahia - (B)



A biomassa total apresentou diferença significativa nas idades de dois, quatro e cinco anos já aos três anos não houve diferença significativa (Tabela 3), e nota-se que aos cinco anos de idade o valor de biomassa foi de 182 Mg ha⁻¹ na talhadia e 147 Mg ha⁻¹ para alto fuste (Figura 5). Valor próximo encontrado em um estudo realizado por Barros (2021), onde obteve a biomassa total de 124,93 Mg ha⁻¹ do mesmo clone de *Eucalyptus urophylla*, aos seis anos de idade em sistema de alto fuste.

Para o acúmulo total de biomassa por idade (gráfico A) o manejo de talhadia foi maior que o de alto fuste para todas as idades analisadas, e isolando somente a última idade com cinco anos o manejo de talhadia apresentou cerca de 19% a mais de acúmulo de biomassa quando comparado ao manejo de alto fuste com a mesma idade. Reis et al. (1990), estudando o acúmulo de biomassa em uma floresta de *Eucalyptus grandis* ao longo do ciclo de crescimento, encontraram percentuais elevados para biomassa de madeira e casca (93,7%).

No entanto os autores relatam que, na fase inicial de desenvolvimento do povoamento (15 meses de idade), a biomassa contida na componente madeira + casca é inferior a 45% do total da biomassa aérea. Com o passar do tempo, estes componentes apresentaram crescente elevação, até atingir mais de 85% da biomassa aérea total, aos 73 meses de idade. Outros autores também observaram que a alocação da biomassa de madeira, inicialmente, era inferior a 50% da biomassa total (Schumacher et al., 2003).

Tabela 3: Teste de T-Student aos dois, três, quatro e cinco anos de idade, sob manejo de alto fuste (H) e talhadia (C)

Manejo	Idade	Mean	StDev	SE Mean	T_Value	P-Value
Alto Fuste	2	68.9	37.3	11.8	-3.56	*0.006
Talhadia	2	82.6	26.1	8.3		
Alto Fuste	3	104	75.7	23.9	-0.10	0.922
Talhadia	3	104.8	49.8	15.7		
Alto Fuste	4	123.5	73.8	23.4	-6.19	*0.000
Talhadia	4	146	79.1	25		
Alto Fuste	5	147.2	73.7	23.3	-11.28	*0.000
Talhadia	5	181.1	77.4	24.5		

Onde: (*) Diferença significativa entre idade e manejo.

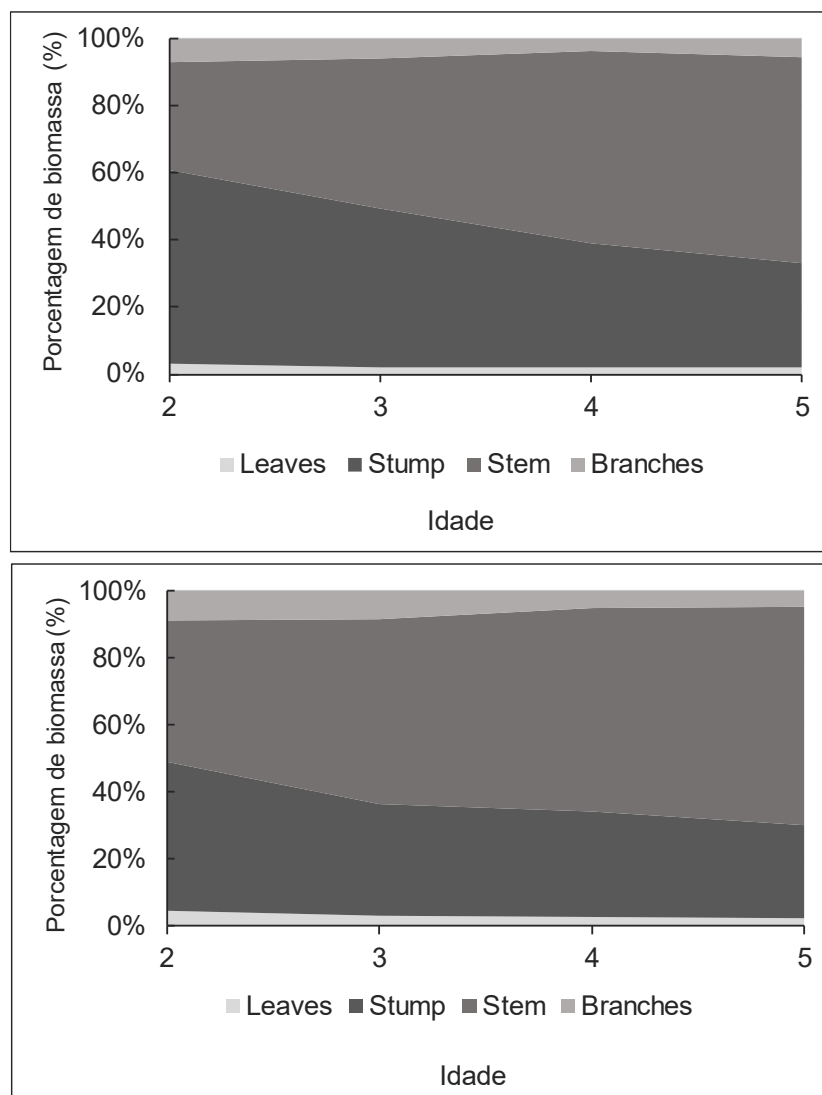
O aumento do acúmulo da biomassa por compartimento foi o principal fator de influência no crescimento do fuste e raízes grossas, foi a idade, enquanto as folhas e galhos não tiveram uma variação significativas em acúmulo de biomassa com o

aumento da idade. O único compartimento que apresentou diferença foi na biomassa de raízes grossas, onde a talhadia obteve maior crescimento em todos os tratamentos. Barros (2021) realizou um trabalho com clones de *Eucalyptus urophylla*, aos seis anos de idade no município de Vitória da Conquista, Bahia e encontrou 18,51 Mg ha⁻¹ de biomassa de raízes grossas em um Latossolo Amarelo distrófico.

Enquanto, Gonçalves (2002), em um plantio de *Eucalyptus grandis* no município de Itatinga, São Paulo, com sete anos de idade, obteve a biomassa de raízes grossas de 20 Mg ha⁻¹ em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. Considerando esses trabalhos como referência a interferência do solo com textura mais argilosa, que se encontra os tratamentos de alto fuste, em relação ao acúmulo de biomassa de Raízes grossas nesse trabalho, que obteve 17 Mg ha⁻¹, possui pouco efeito, sendo o manejo o principal elemento que explica o maior crescimento das raízes.

Entretanto Reis (1985), estudando o acúmulo de biomassa em uma floresta de *Eucalyptus grandis* ao longo do ciclo de crescimento, encontraram percentuais elevados para biomassa de madeira e casca (93,7%). No entanto os autores relatam que, na fase inicial de desenvolvimento do povoamento (15 meses de idade), a biomassa contida no componente madeira + casca é inferior a 45% do total da biomassa aérea. Com o passar do tempo, estes componentes apresentaram crescente elevação, até atingir mais de 85% da biomassa aérea total, aos 73 meses de idade. Outros autores também observaram que a alocação da biomassa de madeira, inicialmente, era inferior a 50% da biomassa total (Schumacher *et al.*, 2003). Enquanto nesse trabalho aos 24 meses observa-se que o valor de fuste corresponde a 55% para alto fuste e 71% para talhadia do total da biomassa aérea e aos 60 meses o valor do fuste conseqüentemente corresponde a 91% e 90% para os manejos acima.

Figura 6 – Distribuição da biomassa (%) de *Eucalyptus urophylla* por compartimento: folha (Leaves), galho (Branches), fuste (Stem) e raízes (Stump), aos dois, três, quatro e cinco anos de idade, sob manejo de alto fuste (A) e talhadia (B), no município de Entre Rios, Bahia



A distribuição dos componentes aos cinco anos de idade nesse trabalho foi fuste > raíz > galhos > folhas, onde seguiu a mesma ordem encontrada no levantamento de produção de biomassa realizado por Gatto (2011), trabalhando em plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais, verificaram que, na idade de 60 meses, a biomassa seca das plantas variou de 87,43 a 177,74 t ha⁻¹, fracionados em lenho (71 %), raízes (15 %), casca (8 %), galhos (4 %) e folhas (2 %). Outro estudo de Barros (2021) encontrou uma ordem similar para a distribuição da biomassa aos 6 anos no município de Vitória da Conquista - Bahia: Fuste (64,9%), Raízes (18,8%), Galhos (10,8%), Folhas (2,8 %) e Casca (2,7%).

Para folhas a proporção de biomassa foi similar nos dois sistemas de manejo para todas as idades. No compartimento raiz a proporção decresce ao passo que a de fuste aumenta ao longo das idades. Uma possível explicação para este comportamento consiste no maior custo energético para desenvolver o sistema radicular de povoamentos sob alto fuste, uma vez que árvores sob talhadia apresentam raízes grossas já estabelecidas no perfil do solo (Bouillet *et al.*, 2008).

Além disso, a manutenção do sistema radicular da rotação anterior mostrou-se compensatória ao longo do tempo, já que a talhadia apresentou maior biomassa aos cinco anos na parte aérea, sobretudo no fuste que é o principal componente de interesse. E os valores de galhos no alto fuste nos primeiros anos de plantio é superior a condução da talhadia. Nas idades de quatro e cinco anos o fuste foi o componente que mais contribuiu com a biomassa total das árvores, representando, em média, 60% da massa seca da biomassa total das árvores no manejo de talhadia e 63% no manejo de alto fuste. E com dois e três anos ocorre uma inversão nos valores, tornando raiz o componente que mais contribuiu com a biomassa em termos de proporção o manejo de talhadia atingiu média de 53% e a alto fuste 39% uma diferença significativa entre os manejos.

Nossos resultados sobre os componentes galho e folha são consistentes e distintos daqueles encontrados na literatura, onde os compartimentos são distribuídos de várias maneiras. No entanto, o componente fuste sempre vem em primeiro lugar, a menos que as plantas sejam muito jovens. (Reis e Barros, 1990). As raízes são a segunda parte mais produtiva da planta em todas as idades e estágios de desenvolvimento, seguindo o fuste. O acúmulo de biomassa está diretamente relacionado às condições agroclimáticas e a capacidade produtiva do setor agrícola da região. (Wang *et al.*, 2008; Resquin *et al.*, 2019; Cavalli *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2020; Barros, 2021).

As estimativas dos parâmetros, as estatísticas coeficiente de correlação entre os valores de diâmetro observado e estimado, desvio padrão (Sigma), erro quadrado médio da raiz (RMSE), e erro quadrado (R^2), se encontra na tabela 4.

Para a abordagem NSUR, o modelo para componentes de biomassa foi ajustado simultaneamente usando mínimos quadrados generalizados e restringindo os coeficientes de regressão, garantindo assertividade. O método NSUR consistiu primeiramente em ajustar e selecionar os melhores modelos para cada componente da árvore. Na tabela abaixo são os modelos que melhor se ajustaram para cada

compartimento.

Tabela 4. Parâmetros estimados para funções de biomassa

Manejo	Compartimentos	$\widehat{\beta}_0$	$\widehat{\beta}_1$	σ (sigma)	R ²	RSME	AIC	BIC
Alto Fuste	Branches (Galhos)	31.85	0.75	3.84	0.53	3.84	363.8	375.7
Alto Fuste	Leaves (Folhas)	10.49	0.66	1.25	0.62	1.36	218.6	230.5
Alto Fuste	Stem (Fuste)	515.53	1.10	0.21	0.99	5.12	438.6	452.9
Alto Fuste	Stump (Raíz)	78.21	0.18	6.69	0.84	5.24	*	*
Talhadia	Branches (Galhos)	23.13	0.64	2.70	0.61	2.70	364.1	376.0
Talhadia	Leaves (Folhas)	9.14	0.63	1.10	0.59	1.10	219.9	231.8
Talhadia	Stem (Fuste)	516.54	1.13	4.80	0.99	5.52	456.8	468.7
Talhadia	Stump (Raíz)	61.85	0.13	5.79	0.49	5.79	*	*

Onde: (*) o número de observações para o compartimentos Stump foi menor em relação ao número de parâmetros do modelo.

Segundo Campos e Leite (2013), o modelo mais usual na representação do perfil do fuste é o modelo linear polinomial de Kozak (1969) devido sua facilidade de ajustamento e precisão nas estimativas, onde esse modelo que foi utilizado. Porém utilizou-se os valores de saída referente a volume para obter as estimativas de parâmetros. Com base nos valores de R² esses modelos foram selecionados pois apresentaram melhor ajustamento de dados. Os dados de Sigma que refere ao desvio padrão mostra que o compartimento raíz no manejo de talhadia ajustou-se melhor. Os valores de coeficiente de regressão, beta 0 e beta 1 apresentaram valores positivos para ambos os manejos, indicando uma boa relação entre x e y.

Analisando os quatro modelos abaixo na figura 7 o compartimento folha, galho e raíz no manejo de alto fuste se ajustou melhor no second model (não linear com sigma constante). E o compartimento fuste se adaptou melhor no fourth model ($\sigma = s_1 \cdot \hat{y}^2$).

Observando a figura 8 no manejo de talhadia, todos os compartimentos: folha, galho, raíz e fuste de ajustaram melhor no second model (não linear com sigma constante).

Figura 7. Modelos de equação para os compartimentos de folhas (leaves), galhos (branches), fuste (stem) e raízes (stump) no manejo de Alto fuste.

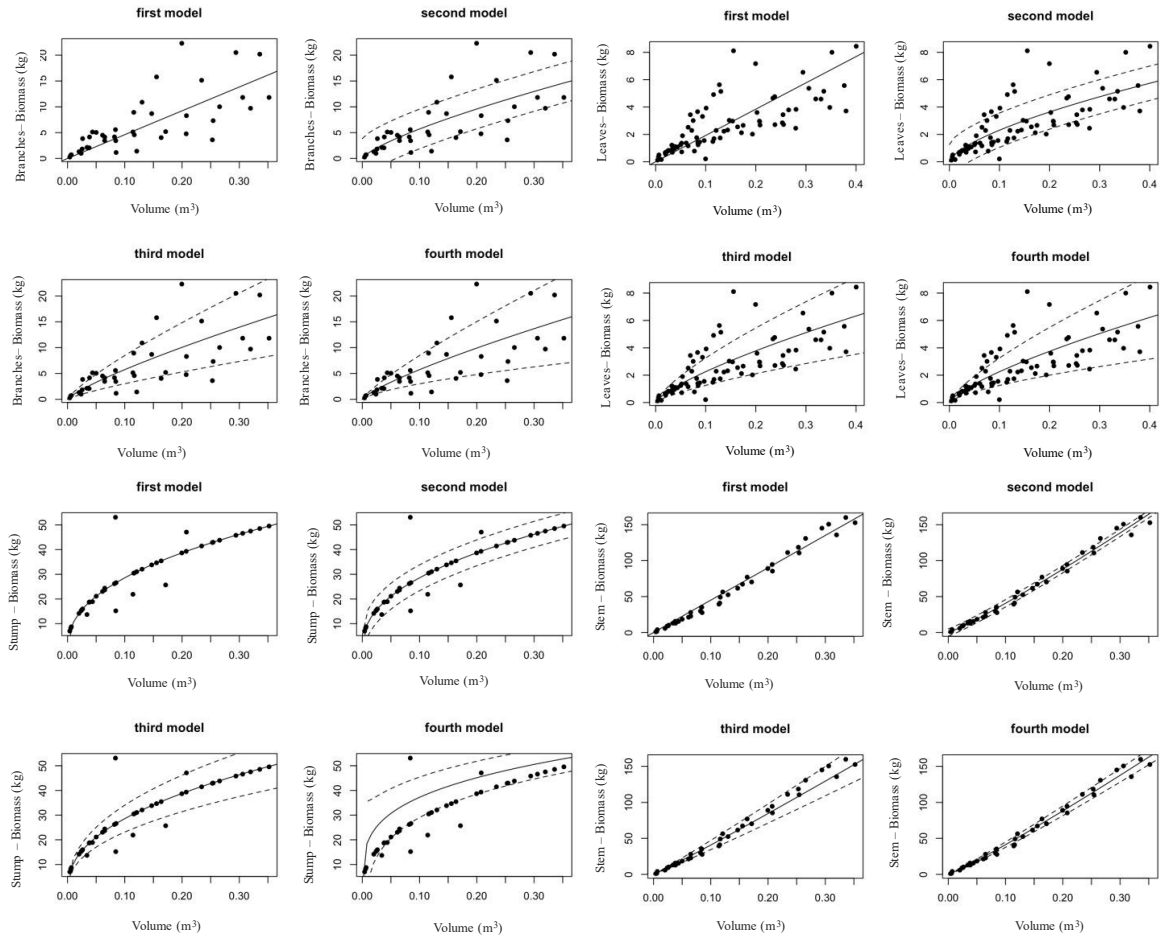
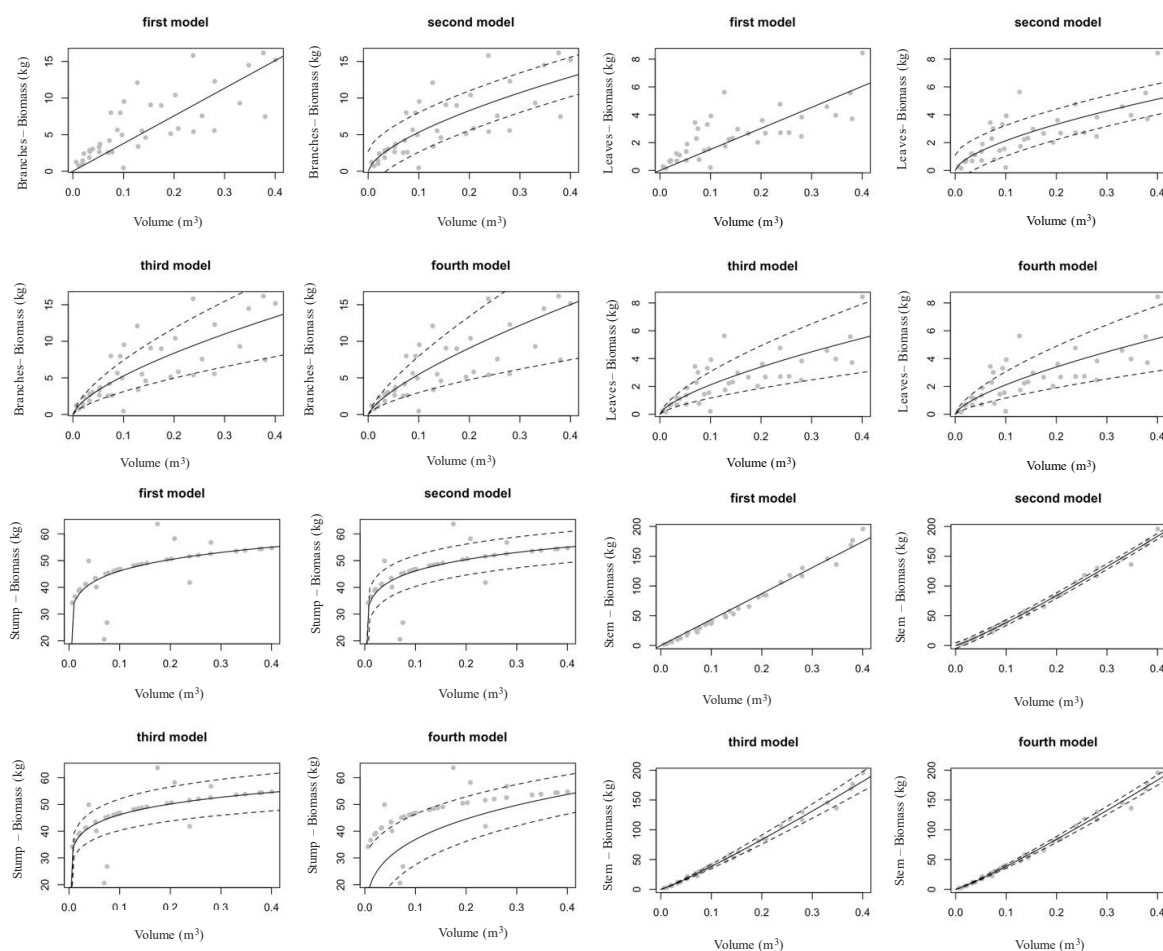


Figura 8. Modelos de equação para os compartimentos de folhas (leaves), galhos (branches), fuste (stem) e raízes (stump) no manejo de Talhadia.



Observando o third model ($\sigma * y$) e o fourth model ($\sigma = s_1 \cdot \hat{y} \cdot s_2$) foram ajustados para modelar a relação entre o desvio padrão dos resíduos e o valor estimado da variável de resposta em um modelo de regressão linear.

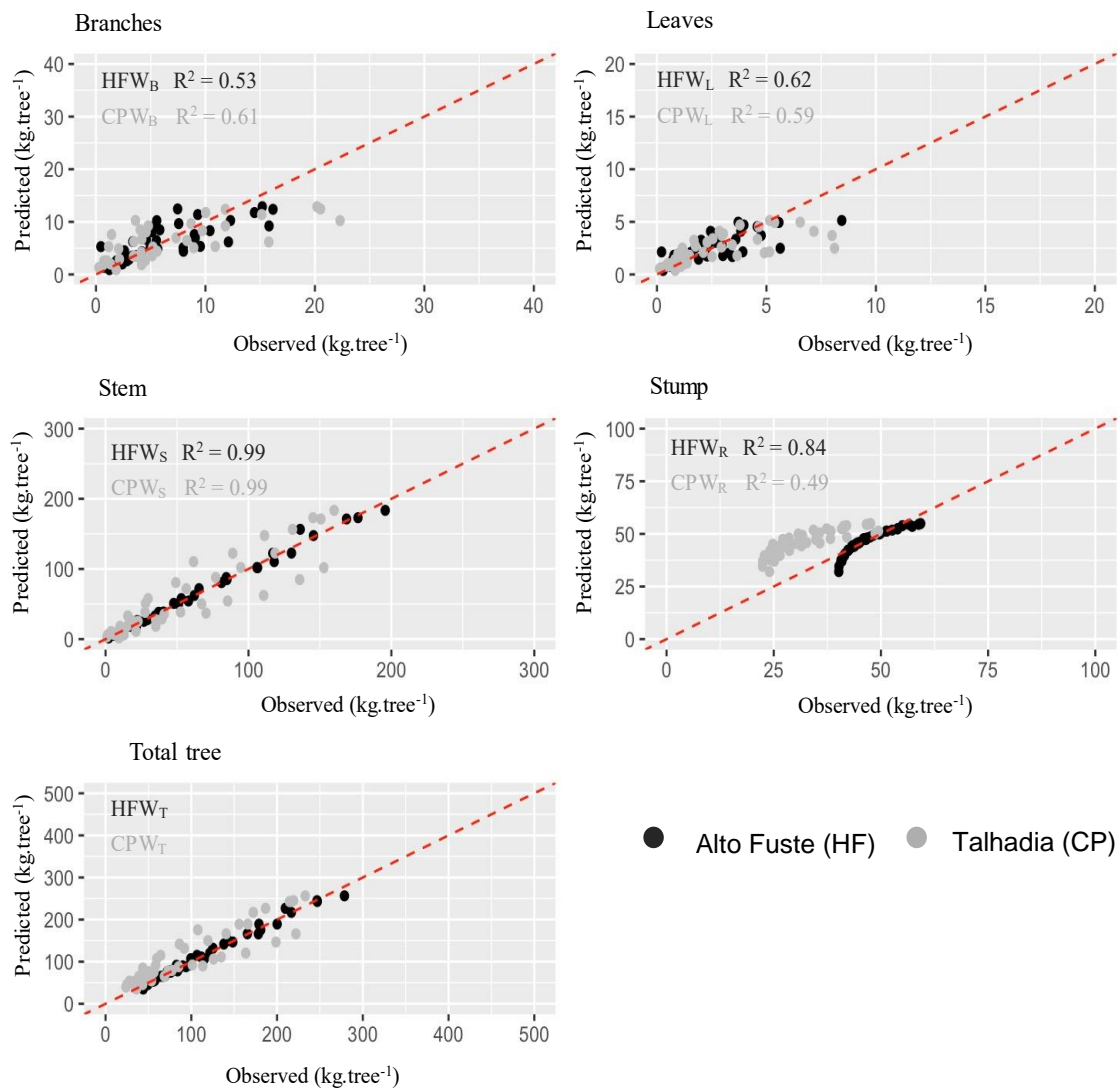
A equação $\sigma * y$ sugere que o desvio padrão dos resíduos é proporcional ao valor previsto da variável resposta. À medida que o valor previsto da variável de resposta aumenta, também aumenta o desvio padrão dos resíduos. Isso implica que os erros no modelo se tornam maiores à medida que os valores previstos se tornam maiores. É usado principalmente em análises de regressão para avaliar a qualidade do ajuste do modelo e para avaliar a precisão dos valores previstos da variável de resposta.

E a equação $\sigma = s_1 \cdot \hat{y} \cdot s_2$ indica que o valor de sigma é determinado pela multiplicação de dois termos. O primeiro termo é s_1 , que representa uma constante positiva que determina a escala de sigma. O segundo termo é $\hat{y} \cdot s_2$, que representa o

valor estimado da variável de resposta elevada à potência s_2 . A potência s_2 é um parâmetro que determina como o valor de y_{est} afeta o valor de σ . Quando s_2 é maior do que 1, isso indica que o desvio padrão dos resíduos aumenta à medida que os valores de \hat{y} aumentam. Por outro lado, quando s_2 é menor do que 1, isso indica que o desvio padrão dos resíduos diminui à medida que os valores de \hat{y} aumentam.

Na figura 9 observa-se um gráfico de "predicted vs. observed", onde foi comparado os valores previstos pelo melhor modelo estatístico e os valores reais observados

Figure 9. Análise de biomassa (kg.tree^{-1}) de valores predicted e observed para os compartimentos: branches (WB), leaves (WL), stem (WS), stump (WR) e total height (WT) para os manejos Alto fuste e Talhadia.



Assim, quando os pontos previstos e observados estão alinhados e próximos à linha diagonal como acontece nesse estudo, isso indica uma excelente concordância entre as previsões feitas pelo modelo estatístico e os valores reais observados nos dados. Esse alinhamento próximo à linha diagonal sugere que o modelo está sendo capaz de capturar de maneira precisa e eficaz a relação subjacente entre as variáveis. Esse resultado é essencial para validar a utilidade e a eficácia do modelo na análise e interpretação dos dados, fornecendo uma base sólida para tomadas de decisão. Por exemplo, em análises de regressão, a proximidade dos pontos à linha diagonal é frequentemente interpretada como uma confirmação de que o modelo está capturando adequadamente a relação entre as variáveis independentes e dependentes. Estudos como o de Harrell Jr. (2015) sobre avaliação de modelos de regressão, destacam a importância da avaliação gráfica, como o gráfico de "predicted vs. observed", como parte fundamental do processo de validação do modelo.

2.4 CONCLUSÃO

Com o acúmulo de biomassa na seguinte sequência: fuste - raiz - galho - folha, sendo o fuste o componente que apresentou maior tendência ao crescimento em função a idade. O manejo de talhadia apresenta um maior acúmulo de biomassa em todas as idades quando comparado ao alto fuste. O melhor modelo para ajuste de equações são os modelos de regressão não lineares.

Ao considerar as diferentes partes da árvore, as equações alométricas simultaneamente calibradas permitem estimar com mais precisão a quantidade de biomassa armazenado na floresta. Além disso, as equações alométricas simultaneamente calibradas permitem uma melhor avaliação da produção de madeira e outros produtos florestais, pois consideram a biomassa total da árvore e suas diferentes partes. Isso pode ser útil para orientar práticas de manejo florestal que visam maximizar a produção de madeira ou outros produtos florestais, ao mesmo tempo em que garantem a sustentabilidade a longo prazo da floresta e a conservação da biodiversidade.

Em resumo, os valores previstos pelo modelo são semelhantes aos valores reais observados, demonstrando uma performance confiável e uma boa capacidade do modelo em fazer previsões precisas sobre o crescimento e a produção das árvores,

o que é essencial para o uso sustentável dos recursos florestais e a conservação da biodiversidade.

A avaliação da biomassa e do estoque de carbono em diferentes sistemas de manejo florestal fornece insights valiosos para entendermos como essas práticas podem contribuir para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade ambiental. Estratégias de manejo florestal sustentável são essenciais não apenas para conservar os recursos naturais, mas também para mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

AKAIKE H (1974). “**A new look at the statistical model identification.**” IEEE Transactions on Automatic Control, 19(6), 716–723

ASTM International. (2019). Standard Test Methods for Determining the Moisture Content of Wood and Wood-Based Materials. ASTM D4442-92(2019), **ASTM International**.

BARROS, W. T. Crescimento, biomassa e eficiência nutricional de híbridos de eucalipto na região sudoeste da Bahia. 2021. 67 f. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Campus de Vitória da Conquista, 2021.

BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BARNARD, H.; FOWNES, J. Age-related decline in forest ecosystem growth: na individual-tree, stand-structure hypothesis. **Ecosystems**. v. 5, p. 58–67, 2002.

BOUILLET, J.-P., LACLAU, J.-P., GONÇALVES, J. L. M., MOREIRA, M. Z., TRIVELIN, P. C. O., JOURDAN, C., SILVA, E. V., PICCOLO, M. DE C., TSAI, S. M., & GALIANA, A. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil: Nitrogen accumulation in the stands and biological N₂ fixation. **Forest Ecology and Management**, 255(12), 3918-3930. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.050>, 2008.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. Mensuração florestal: perguntas e respostas. 4ªed.: **Editora UFV**. Viçosa-MG, 2013. 605p.

CAVALLI, J.P.; REICHERT, J.M.; RODRIGUES, M.F.; Araújo, E.F. de. Composition and functional soil properties of arenosols and acrisols: Effects on *Eucalyptus* growth and productivity. **Soil and Tillage Research**, v. 196, p. 104439, 2020.

CHAVES, R. A.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; PEZZOPANE, J. E. M.; XAVIER, A.; MONTE, M. A. Dinâmica de cobertura de dossel de povoamentos de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden submetidos a desrama artificial e desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 989-998, 2007.

DEMAERSCHALK, J.P. Integrated systems for the estimation of tree taper and Volume.Canadian **Journal Forest Research**, Ottawa, v.3, n.90, p.90-94, 1972.

GATTO, A. Estoques de carbono no solo e na biomassa de plantações de eucalipto na Região Centro-Leste de Minas Gerais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 159p. (**Tese** de Doutorado).

GONÇALVES, J. L. M.; ROCHA, J. H. T.; BAZANI, J. H.; HAKAMADA, R. E. Nutrição e adubação da cultura do eucalipto manejada no sistema de talhadia. In: PRADO, R. M.; WADT, P. G. S. (Ed.). **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**, Jaboticabal: FCAV/CAPEL, 2014. p. 349-382

GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NAMBIAR, E.K.S; NOVAIS, R.F. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. **Management of soil, nutrientes and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997, p. 379-418.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. Conservação e cultivo de solos para plantações de florestas. Piracicaba: **IPEF**, 2002. p. 131-204

GONÇALVES, J.L.M.; WICHERT, M.C.P.; GAVA, J.L.; SERRANO, M.I.P. Soil fertility and growth of *Eucalyptus grandis* in Brazil under diferente residue management practices. In.: NAMBIAR, E.K.S. Site management and productivity in tropical plantation forests. Indonésia: Center for International Forestry Research (CIFOR), 2008. p. 51-62.

GONÇALVES, S. L.; FARIAS, J. R. B.; SIBALDELLI, R. N. R. Eventos climáticos adversos e seus impactos para as culturas de soja, milho e trigo no Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2019. 48 p. (Embrapa Soja. Documentos, 420).

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.P.; LACLAU, J.P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management** 301: 6-27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>

GONÇALVES, J.L.M; BENEDETTI, V. **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 1-58.

HARRELL JR., F. E. Regression modeling strategies: with applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis. Springer 2015.

HUSCH, B.; MILLER, C. L.; BEERS, T. E. Forest mensuration. 3 ed. New York: J. Willey & Sons, 1982. 397p.

IBÁ 2020. Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores - ano base 2019, São Paulo.

IBÁ 2022. Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores - ano base 2021, São Paulo.

IBÁ 2023. Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores - ano base 2022, São Paulo.

KETTERINGS, Q. M.; COE, R.; NOORDWIJK, M. van.; AMBAGAU, Y.; PALM, C. A. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 146, p. 199-209, 2001.

KING, G. FONTI, P.; NIEVERGELT, D.; BÜNTGEN, U.; FRANK, D. Climatic drivers

of hourly to yearly tree radius variations along a 6 °C natural warming gradient. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 168, p. 36-46, 2013.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. G. H. Taper functions and their applications in forest inventory. *Forest Chronicle*, Ottawa, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

KOZAK, A. My last words on taper equations. *Forestry Chronicle*, Mattawa, v. 80, n. 4, p. 507-515, 2004.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M.; GAVA, J. L. Pre- and post-harvest root growth in *Eucalyptus grandis* stands installed in sandy and loamy soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 246, p. 186-195, 2007.

MIYAZAWA, M; PAVAN, M.A; MURAOKA, T; CARMO, C.A.F. de S. do; MELLO, W. J. de. Análises químicas de tecido vegetal. In: SILVA, F.C. da. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. Campinas: **Embrapa Informática Agropecuária**, 1999. p.171-223

MÔRA, R. Funções de afilamento de forma variável e modelagem de efeitos mistos em fustes de *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*. p. 277, 2015.

MOREIRA, A. M. Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 32, n. 5, p. 855-860, 2008.

OLIVEIRA, R. F., BORGES, L. M., & MACHADO, E. C. (2020). The use of drones in forest management: a review. **Journal of Forest Research**, 25(3), 701-714.

ORMEROD, D.W. A simple bole model. **Forest Chronicle**, Toronto, v.49, n.3, p.136-138, 1973.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, Lawrence, v. 45, n. 4, p. i-r, 1999.

PIMENTA, F. M., STAPE, J. L., & BINKLEY, D. (2018). Productivity and aboveground biomass of *Eucalyptus* plantations in Brazil: a review. *Forest Ecology and Management*, 422, 21-34.

QUEIROZ, T. B.; PEREIRA, N. N.; SILVA, J. C. L.; FONSECA, S. A.; MARTINS, E. R. Influence of water regime on initial growth and essential oil of *Eucalyptus globulus*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.47: 03, e20150530, 2017.

RAVINDRANATH, N.H. AND OSTWALD, M. (2008) Methods for Estimating Above-Ground Biomass. *Carbon Inventory Methods: Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects*, Vol. 29, Springer, 113-147.

REIS, M. G. F. et al. Acúmulo de biomassa em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes

produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, n. 2, p. 149-162, 1985.

REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Eds.) **Relação solo-eucalipto** Viçosa-MG: Folha de Viçosa, 1990. p. 265-301.

RESQUIN, F.; NAVARRO-CERRILLO, R.M.; CARRASCO-LETELIER, L.; CASNATI, C.R.; BENTANCOR, L. Evaluation of the nutrient content in biomass of Eucalyptus species from short rotation plantations in Uruguay. **Biomass and Bioenergy**, v. 134, p. 105502, 2020.

RIBEIRO, N.; SIOTE, A. A.; GUEDES, B. S.; STAISS, C. Manual de silvicultura tropical. Maputo: Universidade Eduardo Mondlane; **FAO**, 125 p, 2002.

RIBEIRO, S. C. et al. Above-and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v.262, n.3, p.491-499, 2011.

ROCHA, S.M.G.; VIDAURRE, G.B.; PEZZOPANE, J.E.M.; ALMEIDA, M.N.F.; CARNEIRO, R.L.; CAMPOE, O.C.; SCOLFORO H.F.; ALVARES C. A.; XAVIER A. C.; FIGURA, M.A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in Eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, p. 118290, 2020.

SAIDELLES, F. L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Determinação do ponto de amostragem para a quantificação de macronutrientes em *Acacia mearnsii* De Wild. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 1, p. 49-62, 2010.

SCHWARZ G (1978). "Estimating the dimension of a model." *The Annals of Statistics*, 6(2), 461–464.

STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G., FONSECA, S.R.L., TAKAHASHI, E.N., SILVA, C.R., HAKAMADA, S.R., FERREIRA, J.M., LIMA, A.M., GAVA, J.L., LEITE, F.P., SILVA, G., ANDRADE, H., ALVES, J.M.. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, n.259, v.9, p.1684-1694, 2010.

SCHRODER, T.; HOFIÇO, N. A. S.; ZIMMERMANN, A. P. L.; PEREIRA, L. D.; ROCHA 455 JR, D. S.; MEYER, E.A.; FLEIG, F.D. Métodos de estimativa de volume comercial para 456 *Eucalyptus grandis*: especificidades e recomendações. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 457 33, n. 73, 01-07, 2013.

SCHUMACHER MV, BRUN EJ, RODRIGUES LM, SANTOS EV. Retorno de nutrientes via deposição de serapilheira em um povoamento de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Estado do Rio Grande do Sul. *Árvore* 2003;27:791-798.

SOMOGYI, Z. et al. Indirect methods of large forest biomass estimation. **European Journal of Forest Research**, Berlin, v. 126, n. 2, p. 197-207, 2006.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 94, n. 2, p. 244-255, 2005.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANGUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo florestal e agrícola sustentável depende da compreensão das interações entre a biomassa e o estoque de carbono. Isso permite a implementação de práticas que equilibram a colheita de biomassa com a preservação dos estoques de carbono e a capacidade dos ecossistemas de se recuperarem. O estoque de carbono é frequentemente usado como um indicador da saúde geral dos ecossistemas. Mudanças no estoque de carbono podem sinalizar a manipulação do solo, desmatamento, poluição e outras pressões ambientais.

A modelagem integrada da biomassa e do estoque de carbono desempenha um papel fundamental na compreensão das mudanças ambientais globais e na formulação de estratégias para mitigar as mudanças climáticas e promover a conservação dos ecossistemas terrestres. Essa abordagem pode informar políticas de manejo florestal, conservação da biodiversidade e estratégias de redução de emissões de carbono.

Estudos do acúmulo de biomassa nas raízes e parte aérea do eucalipto demonstram a importância de compreender os processos subterrâneos que influenciam o ciclo do carbono nas florestas. Análise minuciosa desses processos revela a capacidade do eucalipto de acumular significativa quantidade de biomassa radicular, resultando em um estoque de carbono considerável no subsolo.

REFERÊNCIAS

- AKERS, M.K., KANE, M., ZHAO, D., TESKEY, R.O., DANIELS, R.F., 2013. Effects of planting density and cultural intensity on stand and crown attributes of mid-rotation loblolly pine plantations. **For. Ecol. Manage.** 310, 468–475.
- ALFENAS, A.C. et al. **Clonagem e doenças do eucalipto**. 2.ed., Viçosa: UFV, 2009. 500p.
- BALLONI, E. A.; SILVA, A. P. Condução de touças de *Eucalyptus*: resultados preliminares. Boletim Informativo IPEF, v. 6, n. 16, p. B1-B8, 1978.
- BLACKMAN, C. J., ASPINWALL, M. J., RESCO DE DIOS, V., SMITH, R. A., TISSUE, D. T., & GHANNOUM, O. (2017). Greater canopy conductance and associated transpiration under elevated CO₂. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 114(7), E1246-E1255.
- CAMARGO, F. R. A.; SILVA, C. R.; STAPE, J. L. Resultados experimentais da fase de emissão de brotação em *Eucalyptus* manejado por talhadia. **Série técnica IPEF**, v. 11, n. 30, p. 115-122, 1997 de rápido crescimento. Brasília: **IBDF**, 131 p, 1981.
- EMBRAPA. <https://www.embrapa.br/>. 2019.
- FERRARI, M.P.; FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D. Condução de Plantios de *Eucalyptus* em sistema de talhadia. Colombo: **Embrapa Florestas**. 28p, 2004.
- GONÇALVES, J. L. M., STAPE, J. L., LACLAU, J.-P., BOUILLET, J.-P., RANGER, J., & NOUVELLON, Y. (2013). Silvicultural options to enhance productivity and sustainability of *Eucalyptus* plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, 301, 29-41.
- HAKAMADA, R.E., BATISTUZZO, G., LEMOS, C.C., MEULMAN SILVA, R., ALMEIDA, A.C., 2015a. Uso do inventário florestal para identificação de fatores silviculturais e ambientais que afetam a produtividade de *Eucalyptus* manejado sob talhadia. **Sér. Téc. IPEF** 21, 1–80.
- HARRINGTON, C.A., REUKEMA, D.L., 1983. Initial shock and long-term stand development following thinning in a Douglas-fir plantation. **For. Sci.** 29 (1), 33–46
- HOEGH-GULDBERG, O., JACOB, D., TAYLOR, M., GUILLÉN BOLAÑOS, T., BINDI, M., BROWN, S., HARRISON, P. A. (2018). Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In Global Warming of 1.5°C. An **IPCC** Special Report.
- HUBBARD, R., STAPE, J.L., RYAN, M.G., ALMEIDA, A.C., ROJAS, J., 2010. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. **For. Ecol. Manage.** 259, 1714–1721.
- RODRIGUES, G.G., SILVA, L.D., NOUVELLON, Y., 2021. Production and carbon allocation in clonal *Eucalyptus* plantations under different planting spacings. **For. Ecol. Manage.** 493.

ROTH, B.E., LI, X., HUBER, D.A., PETER, G.F., 2007. Effects of management intensity, genetics and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the southeastern USA. **For. Ecol. Manage.** 246 (2–3), 155–162.

RYAN, M.G., STAPE, J.L., BINKLEY, D., FONSECA, S., LOOS, R., TAKAHASHI, E.N., SILVA, C.R., SILVA, S., HAKAMADA, R., FERREIRA, J.M., LIMA, A.M., GAVA, J.L., LEITA, F.P., SILVA, G., ANDRADE, H., ALVES, J.M., 2010. FACTORS controlling *Eucalyptus* productivity: How resource availability and stand structure alter production and carbon allocation. **For. Ecol. Manage.** 259, 1695–170

SIMÕES, J. W.; PEREIRA, R. A. G.; TANAKA, O. K; POMPEU, R. M. Efeito da ferramenta de corte sobre a regeneração do eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 4, p 3-10, 1972.

STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G., 2004. *Eucalyptus* production and the supply, use and the efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **For. Ecol. Manage.** 193, 17–31.

STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G., 2008. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **For. Ecol. Manage.** 255, 920–930.

WHITE, D.A., MCGRATH, J.F., RYAN, M.G., BATTAGLIA, M., MENDHAM, D.S., KINAL, J., DOWNES, G.M., CROMBIE, D.S., HUNT, M.E., 2014. Managing for water-use efficient wood production in *Eucalyptus globulus* plantations. **For. Ecol. Manage.** 331, 272–280.