

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

PEDRO JARA CIPOLA

**INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE, IDADE DE PLANTIO E MATERIAL
GENÉTICO NO ESTOQUE DE BIOMASSA E CARBONO EM POVOAMENTOS DE
EUCALIPTO EM ALAGOAS**

**RIO LARGO - AL
2026**

PEDRO JARA CIPOLA

**INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE, IDADE DE PLANTIO E MATERIAL
GENÉTICO NO ESTOQUE DE BIOMASSA E CARBONO EM POVOAMENTOS DE
EUCALIPTO EM ALAGOAS**

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC,
apresentado a Universidade Federal de Alagoas
– UFAL, *Campus* de Engenharias e Ciências
Agrárias – CECA, como requisito para
obtenção do Título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof. Dra. Vânia Aparecida de Sá

RIO LARGO - AL

2026

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

C577i Cipola, Pedro Jara.

Influência da declividade, idade de plantio e material genético no estoque de biomassa e carbono em povoamentos de eucalipto em Alagoas. / Pedro Jara Cipola. – 2026.

34f.: il.

Orientador(a): Vânia Aparecida de Sá.

Trabalho de Conclusão de Curso (Zootecnia) – Graduação em Zootecnia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2026.

Inclui bibliografia

1. Carbono florestal. 2. Biomassa florestal. 3. Eucalyptus spp. 4. Mitigação das mudanças climáticas. I. Título.

CDU: 630*56: 630*176.1 (813.5)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Jara Cipola

Influência da declividade, idade de plantio e material genético no estoque de biomassa e carbono em povoamentos de eucalipto em Alagoas

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC apresentado à Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias - CECA, como pré-requisito para obtenção do grau de Bacharel(a) Engenheiro(a) Florestal.

Data de Aprovação: 01/06/2026.

Banca Examinadora



Documento assinado digitalmente
VANIA APARECIDA DE SA
Data: 30/06/2026 11:21:08-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) Vânia Aparecida de Sá
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA
(Orientador/a)



Documento assinado digitalmente
ALEXANDRE BEHLING
Data: 30/06/2026 17:12:16-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Behling
Universidade Federal do Paraná - UFPR



Documento assinado digitalmente
MARILIA FREITAS DE VASCONCELOS MELO
Data: 30/06/2026 14:02:45-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) Marília Freitas de Vasconcelos Melo
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela força, saúde e sabedoria ao longo dessa caminhada.

À minha mãe, Mary Cipola, batalhadora e dedicada à família. Meu grande exemplo de vida, sempre investiu na minha educação, sendo uma grande companheira em todos os momentos.

Aos meus irmãos, Victor e Ariel, pela presença constante, pelos conselhos e orientações, e por me ensinarem, de tantas formas, a viver e enfrentar os desafios da vida.

A minha orientadora, Vania Aparecida de Sá, pela paciência, orientação e dedicação durante toda a realização deste trabalho. Sou profundamente grato por todo o conhecimento compartilhado, pelos incentivos constantes e pela presença em cada etapa desta jornada. Ao professor Alexandre que se fez presente nas análises químicas dos teores de carbono.

À Universidade Federal de Alagoas – UFAL, pelo ambiente de aprendizado e crescimento acadêmico e pessoal, fornecendo recursos necessários para minha formação.

Aos amigos pelo companheirismo, incentivo e apoio em todos os momentos, especialmente durante as coletas de campo, nas atividades em sala de aula e nos trabalhos de laboratório. Em especial, aos discentes Fagner Fernandes e Mariana Souza de Santos, por terem me ajudado desde o início desse trabalho. Ter vocês ao meu lado tornaram essa trajetória mais leve, divertida e significativa.

Agradeço também ao Engenheiro Florestal e amigo, Nivandilmo Luiz, por todas as oportunidades e por abrir portas da empresa Lages Agro S.A. para coleta dos dados desse trabalho, e agradecer também a toda equipe da Lages Agro S.A.

RESUMO

O aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera tem aumentado a busca por estratégias capazes de reduzir e mitigar os impactos das mudanças climáticas, destacando-se, nesse contexto, o papel das florestas como importante aliada à fixação de carbono, tanto em florestas nativas quanto plantadas. Assim, o presente trabalho teve como objetivo estimar o estoque de carbono em povoamentos comerciais de *Eucalyptus* spp., localizados no município de Atalaia, estado de Alagoas, bem como avaliar o potencial desses plantios para a fixação de carbono e suas aplicações no setor florestal. Para a obtenção dos dados, foi conduzido um inventário florestal, com parcelas de 420 m², onde foram mensuradas variáveis dendrométricas, como diâmetro à 1,30 m do solo e altura total. A cubagem rigorosa das árvores foi conduzida pelo método de Smalian, possibilitando a estimativa acurada do volume do fuste. A biomassa seca foi determinada a partir da massa úmida e do teor de umidade das amostras, enquanto a densidade básica da madeira foi obtida conforme normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. O teor de carbono orgânico total foi determinado por meio do método de oxidação úmida proposto por Bezerra Neto e Barreto (2011), permitindo a quantificação da massa de carbono por árvore e do estoque total por hectare. Os resultados indicam que os povoamentos de *Eucalyptus* spp. apresentam elevado potencial de produção de biomassa e acúmulo de carbono, com variações associadas às características dendrométricas das árvores e às condições do sítio. Observou-se que o incremento nas variáveis dendrométricas, especialmente diâmetro e altura, esteve diretamente associado ao aumento dos estoques de biomassa e carbono, em nível individual e por hectare. Os maiores estoques de biomassa e carbono foram registrados em povoamentos de maior idade (plantio de 2019), utilizando o clone CO 1407 em áreas de encosta, evidenciando a maior adaptabilidade e desempenho desse material genético em condições ambientais mais restritivas.

Palavras-chave: Carbono florestal. Biomassa florestal. *Eucalyptus* spp. Mitigação das mudanças climáticas.

ABSTRACT

The increase in greenhouse gas concentrations in the atmosphere has intensified the search for strategies capable of reducing and mitigating the impacts of climate change, highlighting, in this context, the role of forests as an important ally in carbon capture, whether native or planted forests. Thus, the present study aimed to estimate the carbon stock in commercial stands of *Eucalyptus spp.*, located in the municipality of Atalaia, state of Alagoas, as well as to evaluate the potential of these plantations for carbon sequestration and their applications in the forestry sector. To obtain the data, a forest inventory was carried out with plots of 420 m², where dendrometric variables were measured, such as diameter at breast height and total height. The rigorous scaling of the trees was conducted using the Smalian method, enabling an accurate estimation of stem volume. Dry biomass was determined from wet mass and moisture content of the samples, while wood basic density was obtained according to technical standards of the Brazilian Association of Technical Standards. The total organic carbon content was determined through the wet oxidation method proposed by Bezerra Neto and Barreto (2011), allowing the quantification of carbon mass per tree and total stock per hectare. The results showed that *Eucalyptus spp.* stands present a high potential for biomass production and carbon accumulation, with variations associated with the dendrometric characteristics of the trees and site conditions. It was observed that the increase in diameter and height of the trees directly resulted in higher biomass and carbon stocks per individual and per hectare. In addition, the obtained values indicate that the evaluated plantations have a relevant carbon sequestration capacity, reinforcing their role as a sustainable alternative in mitigating climate change. Thus, the data confirm the feasibility of using planted forests as important carbon sinks and as a value generation strategy in the forestry sector. The highest capacity for biomass and carbon accumulation was verified in older stands (2019 planting), using the CO 1407 clone, on slope areas, indicating that this genetic material presents greater adaptability and performance even under more adverse conditions.

Keywords: Forest carbon. Forest biomass. *Eucalyptus spp.* Climate change mitigation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	6
1.1 Objetivos.....	7
2 REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1 A cultura do eucalipto	8
2.2 Aspectos silviculturais	9
2.3 Biomassa florestal.....	9
2.4 Estoque de carbono	10
3 MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 Área de Estudo	10
3.2 Condução dos Povoamentos	11
3.3 Delineamento Experimental.....	11
3.4 Inventário florestal e cubagem rigorosa	12
3.5 Amostragem e Preparo das Amostras	13
3.6 Determinação da umidade e da massa seca	13
3.7 Determinação da densidade básica	14
3.8 Determinação do teor de carbono	14
3.9 Estimativa do estoque de carbono.....	15
3.10 Análise Estatística.....	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1 Variáveis dendrométricas e biomassa do fuste	17
4.2 Densidade Básica da Madeira	18
4.3 Massa Seca e Massa Úmida.....	19
4.4 Teores de Carbono	23
4.5 Estoques de Carbono.....	24
4.6 Implicações Silviculturais dos Resultados	25
5 CONCLUSÕES.....	27
REFERÊNCIAS.....	29

1 INTRODUÇÃO

O cultivo de *Eucalyptus* spp. no Brasil destaca-se pela elevada produtividade, ampla adaptabilidade e diversidade de aplicações industriais, consolidando-se como uma das principais bases do setor florestal nacional. A utilização da madeira varia conforme o sistema de manejo e a idade dos povoamentos, abrangendo desde produtos energéticos, como lenha e carvão vegetal, até aplicações de maior valor agregado, como madeira serrada, laminação, celulose, postes, mourões e estruturas para construção civil (Embrapa, 2021).

O mercado florestal global apresenta intensa dinâmica de importação e exportação de produtos madeireiros, com destaque para países desenvolvidos, que desempenham papel estratégico nesse comércio. Em 2023, os Estados Unidos lideraram as importações mundiais de produtos de madeira, com valores próximos a 25 bilhões de dólares, seguidos pela China, com aproximadamente 17,1 bilhões de dólares em importações (Statista, 2025). Esse cenário é impulsionado pelo crescimento da urbanização, pela ampliação do consumo de produtos florestais e pela crescente valorização de materiais sustentáveis (Abimci, 2019).

Paralelamente a intensificação das mudanças climáticas, tem-se ampliado a demanda por produtos madeireiros provenientes de sistemas de produção sustentáveis e certificados. Nesse contexto, a certificação florestal tem se consolidado como importante instrumento para assegurar práticas de manejo ambientalmente adequadas, socialmente responsáveis e economicamente viáveis. Sistemas de certificação, como os promovidos pelo Forest Stewardship Council, permitem a rastreabilidade da produção florestal, fortalecendo a cadeia produtiva e contribuindo para o combate ao desmatamento ilegal e para o cumprimento de metas climáticas globais (FSC, 2025).

Além da certificação florestal, a quantificação de biomassa e carbono em povoamentos florestais possui relevância estratégica para a elaboração de projetos de geração de créditos de carbono. Plantios de eucalipto apresentam elevada capacidade de fixação e armazenamento de carbono atmosférico, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e agregando valor econômico aos empreendimentos florestais (Lacerda, 2020). Segundo Gatto (2011), diferentes compartimentos da árvore e do solo participam ativamente do processo de captura e estocagem de carbono, reforçando o potencial dessas plantações para projetos ambientais vinculados ao mercado de carbono.

O mercado de carbono constitui um mecanismo econômico voltado à mitigação das mudanças climáticas, baseado na compensação de emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). Nesse sistema, organizações que reduzem suas emissões abaixo de limites estabelecidos podem comercializar créditos de carbono gerados a

partir desse excedente (Ipam, 2024). Existem dois principais modelos de mercado de carbono: o regulado, no qual há imposição legal de limites de emissão, e o voluntário, em que empresas e indivíduos adquirem créditos de forma espontânea, geralmente associados a estratégias de sustentabilidade e critérios ESG (Ipam, 2024).

No Brasil, esse mercado ganhou maior relevância com a regulamentação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), em dezembro de 2024, estabelecendo diretrizes para setores emissores e possibilitando futura integração com mercados internacionais (Brasil, 2024). Esse avanço fortalece as estratégias nacionais de mitigação climática e amplia o potencial de investimentos sustentáveis no setor florestal.

Nesse contexto, estudos voltados à quantificação de biomassa e carbono em plantios comerciais tornam-se fundamentais para empresas de base florestal, tanto para fins de certificação quanto para inserção em mercados de carbono. A mensuração acurada dos estoques de carbono permite maior confiabilidade na avaliação dos serviços ecossistêmicos prestados pelos povoamentos florestais, além de subsidiar estratégias de manejo e sustentabilidade (Apcer Brasil, 2022).

Wink et al. (2013) avaliaram povoamentos de *Eucalyptus* sp. com 20, 44 e 240 meses de idade e verificaram que o acúmulo de biomassa e o estoque de carbono acima do solo aumentaram com a idade dos plantios. O material genético é um dos principais fatores que influenciam o crescimento e a produtividade dos povoamentos de eucalipto. Diferentes espécies e clones apresentam capacidades distintas de produzir biomassa, refletindo diretamente na quantidade de carbono armazenada nas plantas. Dessa forma, a seleção de materiais genéticos mais eficientes pode contribuir para o aumento do estoque de carbono em florestas plantadas, favorecendo tanto a produção florestal quanto os benefícios ambientais relacionados à mitigação das mudanças climáticas (Assis et al., 2015).

Entretanto, embora os plantios de eucalipto sejam amplamente utilizados no setor florestal brasileiro, ainda são limitados os estudos para o Estado de Alagoas, que avaliam conjuntamente os efeitos da declividade do terreno, da idade do povoamento e do material genético sobre o estoque de biomassa e carbono, especialmente nas condições edafoclimáticas do Nordeste brasileiro.

1.1 Objetivos

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência da declividade, da idade de plantio e do material genético sobre o estoque de biomassa e carbono em povoamentos comerciais de *Eucalyptus* spp. no estado de Alagoas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do eucalipto

Não existe uma data única e precisa para a introdução do eucalipto no Brasil. Relatos indicam que os primeiros plantios ocorreram em diferentes locais ao longo do século XIX, como no Jardim Botânico e no Museu Nacional do Rio de Janeiro (entre 1825 e 1868), no município de Amparo (SP) entre 1861 e 1863, e no Rio Grande do Sul em 1868 (Embrapa, 2009).

O ano de 2004 marcou o centenário da introdução do eucalipto para fins produtivos no Brasil, iniciada em 1904 por Edmundo Navarro de Andrade, com o objetivo de suprir a demanda por lenha e dormentes da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. Ao longo desse período, o eucalipto passou a ser cultivado com sucesso em todo o território nacional, impulsionado pelas condições favoráveis de solo e clima, avanços tecnológicos e aprimoramento das técnicas de manejo (Martini, 2004).

Nas últimas décadas, o sucesso do setor de florestas plantadas com eucalipto no Brasil está diretamente relacionado aos avanços no melhoramento genético. Esse processo, aliado ao desenvolvimento de técnicas silviculturais e à clonagem, possibilitou significativa adaptação das plantas às condições ambientais, além de expressivos ganhos em produtividade, qualidade do fuste e resistência a doenças. Dessa forma, o melhoramento genético se destaca como um dos principais fatores responsáveis pela viabilidade econômica e pela expansão do cultivo de eucalipto no país. (Embrapa, 2013).

Segundo Alagoas (2025), o estado possui mais de 40 mil hectares de eucalipto plantados. relata que em Alagoas, sendo conduzida em diferentes condições edafoclimáticas. Tendo sua produtividade florestal influenciada por fatores como disponibilidade hídrica e nutricional, densidade de plantio, manejo silvicultural e condições ambientais, em função da interação genótipo-ambiente (Silva, 2022).

2.2 Aspectos silviculturais

A evolução do manejo silvicultural, associada ao uso de materiais genéticos mais eficientes, técnicas adequadas de preparo do solo, definição correta do espaçamento de plantio, adubação mineral e controle das plantas daninhas, contribuiu significativamente para o aumento da produtividade florestal. Essas práticas permitem melhor aproveitamento dos recursos disponíveis no ambiente, favorecendo o crescimento das árvores e elevando o potencial produtivo dos povoamentos de eucalipto (Gonçalves, 2014).

O aumento do crescimento das árvores, representado por maiores valores de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total, está diretamente associado ao maior acúmulo de biomassa e carbono nos povoamentos florestais. Dessa forma, florestas mais produtivas tendem a apresentar maiores estoques de biomassa, pois árvores com maior desenvolvimento possuem maior capacidade de armazenar carbono em seus diferentes compartimentos (Silva, 2015).

2.3 Biomassa florestal

A produção de biomassa e sua distribuição entre parte aérea e sistema radicular variam conforme a espécie, o sítio e o espaçamento. Em plantios mais adensados, há menor alocação de biomassa para as raízes e maior direcionamento para a madeira, enquanto espaçamentos mais amplos favorecem o crescimento radicular. Além disso, a qualidade do sítio também influencia essa distribuição, sendo que áreas mais produtivas apresentam maior proporção de biomassa na madeira, enquanto locais de menor qualidade concentram mais biomassa no sistema radicular (Sartório, 2014).

A produção da massa seca e o estoque de carbono em povoamentos de eucalipto estão diretamente relacionados às condições de sítio, uma vez que fatores como clima, solo e disponibilidade de recursos influenciam o crescimento das árvores e o acúmulo de matéria seca. Dessa forma, áreas com melhores condições edafoclimáticas tendem a apresentar maiores valores de biomassa e carbono, evidenciando a forte correlação entre qualidade do sítio e produtividade florestal (Silva, 2015).

A quantificação da biomassa florestal constitui etapa fundamental para a estimativa dos estoques de carbono, uma vez que o carbono está diretamente associado à matéria seca das árvores. Nesse contexto, a precisão na determinação da biomassa é essencial para garantir a confiabilidade dos dados de carbono. Além disso, a utilização de métodos indiretos e não destrutivos tem se mostrado eficiente, possibilitando a obtenção de estimativas consistentes com menor custo e impacto sobre os povoamentos florestais.

Dessa forma, a biomassa se consolida como a principal variável na avaliação do potencial de sequestro de carbono em florestas plantadas (Ribeiro, 2009).

2.4 Estoque de carbono

O Brasil, apesar de possuir uma legislação ambiental relevante e papel de destaque em acordos climáticos internacionais, instituiu seu mercado regulado de carbono apenas em 2024. A Política Nacional sobre Mudança do Clima já previa a possibilidade de negociação de créditos de carbono, oferecendo base jurídica para o mercado voluntário, que conta com diversas iniciativas públicas e privadas. Nesse contexto, o país apresenta elevado potencial para geração de créditos de carbono, especialmente nos setores agropecuário e florestal, devido ao baixo custo de produção. Além disso, o mercado voluntário tem sido amplamente utilizado, inclusive para suprir lacunas na compensação de emissões de setores como o de óleo e gás (Vieira, 2025).

O mercado de carbono consiste em um instrumento econômico que visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa por meio da precificação do carbono, incentivando práticas mais sustentáveis. No Brasil, esse mecanismo foi regulamentado pelo Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024, que adota o modelo cap-and-trade, no qual empresas podem comprar e vender permissões de emissão conforme seu desempenho ambiental (Brasil, 2024).

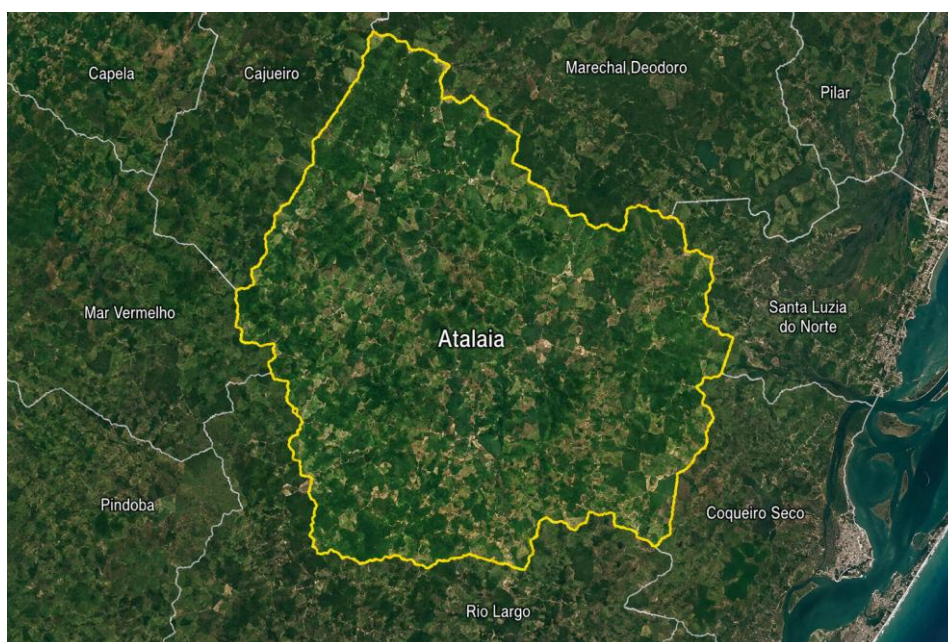
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados de plantios comerciais de eucaliptos de uma empresa de base florestal, situada no município de Atalaia, no estado de Alagoas, localizado sob as coordenadas (9° 01' 05.17" S) (36° 01' 29.98" O), com diferentes clones, declividades e idades de plantios, totalizando 8 talhões e 4 fazendas diferentes. As idades dos plantios variaram entre 5 e 6 anos, aproximadamente. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo subúmido úmido, com altas taxas de precipitação e temperaturas elevadas o ano todo. Os solos predominantes da região são os Argissolos e os Latossolos Amarelo.

Os povoamentos foram escolhidos conforme o delineamento experimental, com o material genético, idade e declividade adequada para cada tratamento.

Figura 1 – Município de Atalaia, Alagoas



Fonte: (IBGE 2025).

3.2 Implantação dos Povoamentos

Os talhões foram implantados nos anos de 2019 e 2020, respectivamente, com realização de atividades de correção e preparo do solo por métodos manuais e mecanizados. Em áreas com maior declividade, as operações foram realizadas manualmente, enquanto nas planas predominou o uso de mecanização. As operações de plantio foram realizadas com a utilização de matraca, facilitando o trabalho manual e mantendo uma ergonomia para os trabalhadores rurais. O material genético avaliado foi o híbrido *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* (urograndis).

3.3 Delineamento Experimental

O experimento foi conduzido em delineamento fatorial $2 \times 2 \times 2$, considerando três fatores: material genético (dois clones), idade de plantio (5 e 6 anos) e declividade do terreno (duas classes: plana e encosta). A combinação desses fatores resultou em oito tratamentos experimentais, nos quais cada talhão foi considerado uma unidade experimental. Para cada tratamento foram amostradas 5 árvores.

A Tabela 1 apresenta o plano experimental para as análises deste estudo.

Tabela 1 – Delineamento Experimental

Tratamento	Clone	Codificação	Idade, anos	Declividade	3.4
T1	AR01	Clone 1	6	Plana	
T2	AR01	Clone 1	6	Encosta	
T3	AR01	Clone 1	5	Plana	
T4	AR01	Clone 1	5	Encosta	
T5	1407	Clone 2	6	Plana	
T6	1407	Clone 2	6	Encosta	
T7	1407	Clone 2	5	Plana	
T8	1407	Clone 2	5	Encosta	

Inventário florestal e cubagem rigorosa

Em cada tratamento, foram alocadas parcelas distribuídas aleatoriamente no interior dos talhões. As parcelas apresentaram dimensões de 20 m × 21 m, totalizando 420 m². Sendo instalada uma parcela a cada 3 hectares.

Em cada parcela, foram mensuradas todas as árvores quanto à circunferência à altura do peito (CAP), a 1,30 m do solo, utilizando fita métrica graduada. Posteriormente, os valores foram convertidos em diâmetro à altura do peito (DAP).

As alturas totais foram mensuradas nas árvores localizadas nas duas primeiras linhas de plantio de cada parcela, bem como nas cinco árvores dominantes, utilizando clinômetro eletrônico.

Para a cubagem rigorosa, foi selecionada uma árvore de diâmetro médio em um raio de até 50 m da parcela.

A cubagem foi realizada por meio do abate das árvores selecionadas, utilizando motosserra. Foram mensurados os diâmetros com casca nas alturas de 0,10 m, 0,30 m, 0,50 m, 1,30 m e, a partir dessa altura, em intervalos de 1 m até o diâmetro mínimo comercial de 5 cm.

Para obtenção do volume do fuste, utilizou-se o método de Smalian (Equação 1), sendo o volume do fuste correspondente à soma dos volumes das seções das árvores mais o volume do topo (Equação 2).

$$V_{seção} = \frac{\left[\left(\frac{D_{base}^2 \cdot \pi}{4}\right) + \left(\frac{D_{topo}^2 \cdot \pi}{4}\right)\right]}{20000} \cdot h \quad (1)$$

$$V_{topo} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{D_{base}^2 \cdot \pi}{40000}\right) \cdot h \quad (2)$$

Em que: $V_{\text{secção}}$ = Volume da tora/secção, em m^3 ; D_{base} = Diâmetro na base da tora/secção, em cm; D_{topo} = Diâmetro do topo da tora/secção, em cm; h = Comprimento da tora/secção, em m.

E: V_{topo} = Volume do topo da árvore, em m^3 .

3.5 Amostragem e Preparo das Amostras

Foram selecionadas cinco árvores por tratamento para amostragem destrutiva. Após o abate, as árvores foram desfolhadas, desganhadas e separadas em compartimentos, parte aérea (folhas e galhos) e fuste.

Para análise da massa úmida total da parte aérea, foram retirados todos os galhos e folhas das árvores amostradas, pesadas em campo individualmente cada compartimento. Para estimar o teor de umidade por árvore, foram separadas amostras de aproximadamente 200 gramas e colocadas em um saco do tipo kraft, pesadas em campo também. As amostras foram secas em estufa até atingir massa constante e pesadas novamente para determinar o teor de umidade.

Para analisar as características do fuste, foram retirados discos de madeira com aproximadamente 5 cm de espessura nas posições correspondentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do fuste, no qual considerou-se diâmetro mínimo de 4 cm. As amostras foram acondicionadas em recipientes adequados para evitar perda de umidade e posteriormente encaminhadas ao laboratório de Produtos Florestais do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), onde os discos foram divididos em 4 cunhas, sendo elas 2 opostas para determinar o teor de umidade e outras duas para determinar a densidade básica.

3.6 Determinação da umidade e da massa seca

Para a determinação da umidade seguiu-se a metodologia descrita na norma NBR 14929 (ABNT NBR 14929:2017). As amostras, depois de preparadas, foram pesadas em balança de precisão (0,01g) para a obtenção da massa úmida. Depois de pesadas, foram secas em estufa a uma temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingir massa constante. A partir desses dados, foi determinado o teor de umidade e a massa seca dos diferentes compartimentos da árvore. Após a determinação do teor de umidade, a massa seca da parte aérea das árvores cubadas foi estimada com base na Equação 3.

$$Ms = \frac{Mu}{(1 + (\frac{U}{100}))} \quad (3)$$

Em que: Ms = Massa seca, em kg; Mu = Massa úmida, em kg; U= Percentual de umidade, em %.

A determinação da massa seca do fuste foi calculada conforme a Equação 4.

$$Ms = VFuste * DB \quad (4)$$

Em que: Ms = Massa seca, em kg; VFuste = Volume do fuste, em m³; DB = Densidade Básica, em Kg.m⁻³

3.7 Determinação da densidade básica

Para determinação da densidade básica, as amostras foram totalmente saturadas em água e, posteriormente, tiveram seus volumes determinados a partir do método da pesagem do material deslocado em água. Em seguida, as cunhas foram totalmente secas em estufa de circulação forçada de ar a uma temperatura de 103 °C ± 2 °C até peso constante, a fim de se obter as massas secas, de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003). Depois de obtido o volume verde (m³) e a massa seca (kg) procedeu aos cálculos da densidade básica.

3.8 Determinação do teor de carbono

As cunhas foram aplainadas para retirada de serragem, posteriormente, reduzidas em um moinho tipo wiley, onde as posições correspondentes à elas foram todas misturadas perfazendo uma amostra composta. Já as amostras de galhos e folhas foram reduzidas em um triturador para irem também ao moinho tipo Willey. As serragens resultantes de todas as amostras foram classificadas em conjunto de peneiras, no qual foram utilizadas as amostras que passaram pela peneira de 220 mesh's. O teor de carbono orgânico total foi determinado pelo método de oxidação úmida, utilizando dicromato de potássio em meio ácido, conforme metodologia proposta por Bezerra Neto e Barreto (2011).

As amostras secas e moídas foram submetidas à digestão química e posterior titulação, permitindo a quantificação do carbono presente nos diferentes compartimentos da árvore.

Para a análise, as amostras previamente secas e moídas foram homogeneizadas, sendo pesados 0,1 g de material em balança analítica de precisão. As amostras foram transferidas para

erlenmeyers de 500 mL, aos quais foram adicionados 20 mL de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) 1 N e 40 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Em seguida, as amostras foram submetidas ao aquecimento em fervura branda por aproximadamente cinco minutos, visando promover a oxidação da matéria orgânica presente.

Após o resfriamento natural, foram adicionados 200 mL de água destilada, 10 mL de ácido fosfórico concentrado e 1 mL de indicador difenilamina. A titulação foi realizada com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$) 0,5 N, até a mudança de coloração do meio, de púrpura para verde, indicando o ponto final da reação.

De acordo com a estequiometria do método, cada mililitro de dicromato de potássio 1 N reduzido corresponde a 3 mg de carbono oxidado. A partir do volume gasto na titulação e da massa da amostra analisada, foi calculada a percentagem de carbono orgânico total presente na amostra, expressa em base de matéria seca. Foi utilizado no cálculo, o teor de carbono médio por material genético, para cada compartimento.

3.9 Estimativa do estoque de carbono

A estimativa do carbono por árvore foi realizada a partir da relação entre volume do fuste, densidade básica da madeira e teor de carbono. O estoque de carbono por hectare foi obtido pela multiplicação do carbono médio por árvore pelo número de indivíduos por hectare em cada tratamento.

Inicialmente, os volumes dos fustes foram estimados, conforme a Equação 5.

$$V_{fuste} = \sum V_{seção} + V_{topo} \quad (5)$$

Em que: V_{fuste} = volume total da árvore cubada, em m^3 ; $V_{seção}$ = Volume da tora/secção, em m^3 ; V_{topo} = Volume do topo da árvore, em m^3 .

Posteriormente, a fim de se obter a massa de carbono por árvore, procedeu aos cálculos com base na Equação 6.

$$C_{Árvore} = (V_{fuste} \cdot DB) \cdot \frac{\%C}{100} \quad (6)$$

Em que: $C_{Árvore}$ = Massa de Carbono por árvore, em kg; V_{fuste} = Volume total do fuste amostrado, em m^3 ; DB = Densidade básica da madeira, em $kg.m^{-3}$; $\%C$ = Teor de carbono na madeira, em %.

Por fim, foram estimados os estoques de carbono por hectare a partir da relação entre a massa de carbono por árvore e o número de árvores por hectare de cada tratamento (Equação 7).

$$\frac{C}{ha} = C_{\text{árvore}} \cdot N \quad (7)$$

Em que: C/ha = Estoque de carbono por hectare; em kg/ha; N = número de árvores por hectare.

3.10 Análise Estatística

Os dados foram submetidos à análise estatística utilizando delineamento em esquema fatorial $2 \times 2 \times 2$, sendo avaliados três fatores: material genético (dois clones), declividade do terreno (dois níveis) e ano de plantio (dois níveis). A combinação desses fatores resultou em oito tratamentos experimentais.

Inicialmente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com o objetivo de verificar a existência de efeitos significativos dos fatores principais e de suas interações sobre a variável analisada. Quando identificada significância estatística pelo teste F a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$), procedeu-se ao desdobramento das interações significativas.

Para comparação das médias entre os tratamentos foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Nos casos em que foram observadas interações significativas entre os fatores, realizou-se o desdobramento das interações, permitindo avaliar o comportamento de um fator dentro dos níveis dos demais.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software Sisvar, amplamente utilizado em experimentos agronômicos e florestais para análise de variância e comparação de médias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis dendrométricas e biomassa do fuste

Os valores médios para volume, densidade básica e massa seca do fuste estão apresentados na tabela 2.

Observou-se variação nos valores de volume do fuste entre os tratamentos, refletindo diferenças de crescimento associadas ao material genético e às condições de sítio. A densidade básica da madeira apresentou valores dentro da faixa esperada para o gênero *Eucalyptus*, contribuindo diretamente para a estimativa da massa seca do fuste. A biomassa (massa seca) apresentou variação entre os tratamentos, no qual foi encontrados valores médios entre 29,97 Kg e 87,85 Kg.

Tabela 2 – Volume do fuste, densidade básica da madeira e massa seca do fuste em função dos

Tratamento	Volume (m ³)	Densidade Básica (kg/m ³)	Massa Seca Fuste (kg)
1	0,151175	487,5381	73,9972
2	0,097742	455,6524	44,6183
3	0,105463	457,6617	48,2994
4	0,106873	421,0797	45,3184
5	0,132704	424,0563	56,6116
6	0,214795	408,9566	87,8544
7	0,102715	432,186	44,3643
8	0,068238	439,4392	29,9726
Média	0,122	441,9924	54,1298
CV	15,58%	5,06%	19,32%

tratamentos

O volume do fuste foi significativamente influenciado pela interação entre clone, ano de plantio e declividade (Tabela 3). Em áreas planas, não foram observadas diferenças entre os clones. Contudo, em áreas de encosta, verificaram-se respostas distintas entre os clones evidenciando forte interação genótipo × ambiente.

Tabela 3 – Desdobramento da interação entre clone, ano de plantio e declividade para o volume do fuste

Idade	Clone 1		Clone 2	
	Plano	Encosta	Plano	Encosta
	----- m ³ -----			
6 anos	0,151 a	0,098 b	0,133 a	0,215 a
5 anos	0,105 a	0,107 a	0,103 a	0,068 b

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

Observa-se como resultados, que em áreas planas o fator clone não tende a diferir estatisticamente seu volume, para as áreas mais acentuadas, o clone 2 (CO1407) aos 6 anos de idade teve um melhor desenvolvimento, em volume, enquanto aos 5 anos de idade o clone 1 (AR01) ficou a frente do clone 2.

A significância da interação clone $\times$ idade $\times$ declividade demonstra que o volume do fuste é resultado da combinação entre material genético, variação temporal e condição topográfica. Observou-se que o efeito do ano varia conforme o clone e a declividade, assim como o efeito da declividade depende do clone e do ano avaliado. Esse comportamento evidencia uma interação genótipo $\times$ ambiente complexa, impossibilitando a recomendação generalizada de clones sem considerar simultaneamente o ano de avaliação e a condição do terreno.

Contudo, os valores dos volumes apresentados são confiáveis, seguindo um padrão de volume médio apresentado por espécies do gênero *Eucalyptus* spp., como relatado por (Martins et al., 2021).

4.2 Densidade Básica da Madeira

A tabela abaixo (tabela 4) apresenta os valores médios da densidade básica para os tratamentos avaliados.

Tabela 4 – Desdobramento da interação entre os fatores avaliados para Densidade Básica do fuste

Clone	Idade		Declividade	
	6 anos	5 anos	Plano	Encosta
	----- kg/m ³ -----			
1	481,03 a	436,75 a	474,20 a	443,58 a
2	417,89 b	432,29 a	424,62 b	425,56 a

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

Para a densidade do fuste a interação entre clone $\times$ idade $\times$ declividade, não foi significativa, porém o teste de Tukey evidenciou efeito significativo das interações clone $\times$ idade e clone $\times$ declividade. Com 6 anos, o Clone 1 apresentou maior densidade da madeira em comparação ao Clone 2, enquanto com 5 anos não foram observadas diferenças entre os materiais genéticos. Em relação à declividade, o Clone 1 apresentou maior densidade em áreas planas, não havendo diferença entre clones em áreas declivosas. Esses resultados indicam que a densidade do fuste apresenta comportamento relativamente estável, sendo influenciada

pontualmente pelo material genético em condições ambientais e temporais específicas (Meneses et al., 2015).

4.3 Massa Seca e Massa Úmida

A tabela abaixo (tabela 5) apresenta os resultados médios de cada tratamento, para a massa seca do fuste.

Tabela 5 – Desdobramento da interação entre os fatores avaliados para Massa Seca do fuste

Idade	Clone 1		Clone 2	
	Plano	Encosta	Plano	Encosta
	----- Kg -----			
6 anos	75,62 a	45,50 b	56,61 b	88,43 a
5 anos	47,78 a	45,39 a	43,67 a	30,04 b

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

A variável massa seca apresentou efeito significativo do fator idade, bem como das interações clone $\times$ idade, clone $\times$ declividade e clone $\times$ idade $\times$ declividade, indicando que o desempenho dos clones varia conforme as condições ambientais avaliadas. O teste de Tukey evidenciou que, em determinadas combinações de ano e declividade, os clones diferiram estatisticamente quanto à massa seca, enquanto em outras não houve diferença significativa. Esses resultados demonstram que a resposta produtiva dos materiais genéticos é dependente do ambiente, reforçando a importância da análise conjunta dos fatores na seleção de clones mais adaptados.

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados da massa total úmida, teor de umidade e massa seca dos componentes folhas e galhos das árvores amostradas.

Tabela 6 – Massa úmida total, teor de umidade e massa seca das folhas por tratamento

Tratamento	MTU (kg)	Umidade (%)	Massa Seca (kg)
1	3,837	50,6392	1,8860
2	3,565	53,5965	1,5543
3	3,152	56,4664	1,3513
4	2,919	48,7942	1,4825
5	5,835	54,6263	2,6521
6	4,428	66,4572	1,4888
7	2,865	62,1264	1,3336
8	3,756	57,1414	1,4157
Média	3,795	56,2309	1,6455
CV	20,64%	3,17%	21,29%

Tabela 7 – Massa úmida total, teor de umidade e massa seca dos galhos

Tratamento	MTU (kg)	Umidade (%)	Massa Seca (kg)
1	8,980	48,4387	4,5632
2	3,278	55,9783	1,4719
3	3,392	54,4433	1,5746
4	4,635	53,9374	2,1238
5	5,722	55,7618	2,5206
6	5,777	51,7933	2,7545
7	3,025	55,6067	1,3247
8	3,442	53,4428	1,5940
Média	4,7813	53,6753	2,2308
CV	41,21%	6,19%	40,9%

A tabela 8 apresenta o desdobramento da interação dos fatores massa total úmida e umidade das folhas.

Tabela 8– Desdobramento da interação entre os fatores avaliados para Massa Total e Úmida das folhas

Idade	Clone 1		Clone 2	
	Plano	Encosta	Plano	Encosta
	----- Kg -----			
6 anos	3,837 b	3,565 a	5,835 a	4,428 a
5 anos	3,153 a	2,919 a	2,865 a	3,756 a

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

A interação tripla entre clone, idade e declividade foi significativa ($p < 0,05$), indicando que o efeito dos materiais genéticos sobre a massa úmida de folhas depende das condições ambientais avaliadas. O desdobramento mostrou diferença significativa entre clones apenas na combinação 6 anos em declividade 1, onde o clone 2 apresentou maior média (5,835 kg) em comparação ao clone 1 (3,837 kg). Nas demais combinações de idade e declividade não foram observadas diferenças estatísticas.

A massa úmida da biomassa vegetal está diretamente associada ao teor de umidade presente nos tecidos das plantas, uma vez que o peso total da amostra corresponde à soma da matéria seca e da água contida no material vegetal (Orellana, 2019).

Neste estudo, o teor médio de umidade das folhas foi de 56,23%, valor compatível com a literatura para espécies do gênero *Eucalyptus*, nas quais os tecidos foliares normalmente apresentam elevados conteúdos de água. De acordo com Schumacher e Caldeira (2001), folhas de eucalipto frequentemente apresentam teores de umidade superiores a 50%, o que resulta em valores de massa fresca significativamente maiores em comparação à massa seca. Resultados semelhantes também foram observados por Laclau et al. (2010), que destacam que a umidade da biomassa vegetal exerce forte influência sobre a massa úmida. Dessa forma, os valores observados neste estudo encontram-se dentro do padrão reportado para plantações comerciais de eucalipto, evidenciando a coerência dos resultados obtidos.

A tabela abaixo (tabela 9) apresenta os dados médios dos tratamentos para a massa total úmida, relacionada a todos os fatores avaliados nesse trabalho.

Tabela 9 – Desdobramento da interação entre os fatores avaliados para Massa Total Úmida dos galhos

Idade	Clone 1		Clone 2	
	Plano	Encosta	Plano	Encosta
	----- Kg -----			
6 anos	8,98 a	3,28 a	5,72 b	5,78 a
5 anos	3,39 a	4,64 a	3,03 a	3,44 a

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A análise de variância indicou efeito significativo para o fator idade, bem como para a interação entre idade e declividade e para a interação tripla entre clone, idade e declividade na variável massa úmida de galhos ($p \leq 0,05$). Dessa forma, procedeu-se ao desdobramento da interação para melhor compreensão dos efeitos dos fatores avaliados.

Na idade de 6 anos na menor declividade (nível 1), observou-se diferença significativa entre os clones, sendo o Clone 1 superior, apresentando média de 8,98 kg, enquanto o Clone 2 apresentou média de 5,72 kg. Nos demais níveis de combinação entre ano e declividade, não foram observadas diferenças estatísticas entre os clones, indicando comportamento semelhante entre os materiais genéticos nessas condições ambientais.

A distribuição da biomassa na copa do eucalipto normalmente apresenta maior contribuição dos galhos em relação às folhas. Estudos com clones de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* demonstraram que os galhos representaram cerca de 13,14% da biomassa aérea, enquanto as folhas corresponderam a aproximadamente 11,49%, indicando maior

acúmulo de massa nos galhos devido à presença de tecidos lenhosos e maior volume estrutural, quando comparados com as folhas anteriormente citada (Rosim, 2013).

Os valores apresentados na tabela abaixo (tabela 10) mostram a interação dos valores médios de cada tratamento para a massa seca das folhas.

Tabela 10 – Desdobramento da interação entre os fatores idade e declividade para massa seca das folhas

Idade, anos	Massa seca, Kg	
	Plano	Encosta
6	2,269 a	1,522 a
5	1,342 b	1,449 a

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

A análise de variância não indicou efeito significativo para a interação tripla, mas para os fatores idade e declividade foi significativa ($p < 0,05$), entre esses fatores sobre a massa seca das folhas. O desdobramento da interação idade $\times$ declividade, avaliado pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, demonstrou que em áreas de declividade plana houve diferença significativa entre os anos avaliados. Nesse caso, o plantio com idade de 6 anos apresentou maior massa seca média de folhas (2,269 kg) em comparação ao plantio de 5 anos de idade (1,342 kg).

Por outro lado, nas áreas de encosta não foram observadas diferenças estatísticas entre as idades avaliadas, apresentando médias de 1,522 kg e 1,449 kg para as idades de 6 e 5 anos, respectivamente. Esse resultado indica que o efeito temporal do plantio influenciou a produção de massa seca apenas em áreas planas, enquanto nas áreas de encosta o comportamento foi semelhante entre as idades.

Os valores apresentados na tabela abaixo (tabela 11) mostram a interação dos valores médios de cada tratamento para a massa seca dos galhos.

Tabela 11 – Desdobramento da interação entre os fatores avaliados para Massa Seca dos Galhos

Idade	Clone 1		Clone 2	
	Plano	Encosta	Plano	Encosta
----- Kg -----				
6 anos	4,56 a	1,47 b	2,52 b	2,75 a
5 anos	1,57 a	2,12 a	1,32 a	1,51 a

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

Houve significância na interação tripla, ($p < 0,01$), os resultados apontam que na idade de 6 anos com declividade plana o clone 1 apresentou maior massa seca de galhos, com média de 4,56 kg, diferindo estatisticamente do clone 2, que apresentou média de 2,52 kg. Já na idade de 6 anos com declividade de encosta, ocorreu comportamento inverso, onde o clone 2 apresentou maior média (2,75 kg) em comparação ao clone 1 (1,47 kg). No entanto, com 5 anos, independentemente da declividade, não houve diferença significativa entre os clones, indicando comportamento semelhante entre os materiais genéticos nessas condições.

4.4 Teores de Carbono

Os dados de teor de carbono foram submetidos à análise de variância em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2×3 , sendo dois materiais genéticos e três compartimentos da árvore (folha, galho e fuste), com cinco repetições.

Os teores de carbono orgânico total determinados para os dois materiais genéticos avaliados neste estudo encontram-se apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Teor de carbono orgânico total nos diferentes compartimentos da árvore, por material genético

Clone	Folhas	Galhos	Fuste
Clone 1	45%	53%	42%
Clone 2	45%	49%	49%

A análise de variância não indicou efeito significativo do material genético, do compartimento da árvore, nem da interação entre os fatores para o teor de carbono ($p > 0,05$). O valor médio geral encontrado foi de 47%, e coeficiente de variação de 12,66%. Dessa forma, não foi necessária a aplicação do teste de comparação de médias.

Os teores de carbono observados neste estudo variaram entre 42% e 53% para os compartimentos avaliados. Esses resultados estão de acordo com a literatura para espécies do gênero *Eucalyptus*, nas quais o teor de carbono na biomassa lenhosa tende a apresentar baixa variação entre tratamentos ou materiais genéticos. Estudos indicam que a composição química da madeira mantém proporções relativamente estáveis de carbono, sendo comum valores próximos a 49%, considerados como média para materiais lenhosos (Pedrosa, 2013). Para *Eucalyptus* spp., diversos trabalhos relatam valores semelhantes, entre 45,81% e 48,59% (Santos et al., 2012) e (Araujo et al., 2020) que relataram entre 44,87% e 44,99%. Araujo também relatou, que a biomassa é inversamente proporcional ao espaçamento, tendo em vista

que o espaçamento avaliado no trabalho citado, foi até 8 metros, condizem com a realidade descrita neste trabalho, no qual foi avaliado a biomassa e o carbono em espaçamentos menores.

4.5 Estoques de Carbono

Os resultados finais referentes ao estoque total de carbono encontram-se apresentados na Tabela 13, considerando a massa seca estimada, o teor de carbono dos materiais genéticos e a área total de cada talhão avaliado.

Tabela 13 – Estoque de carbono por árvore, por hectare e total por tratamento

Tratamento	Carbono/Árvore (Kg)	Carbono/ha (kg)	Carbono total (kg)
1	35,0	33.360,3	156.793,7
2	20,6	19.644,6	97.240,6
3	21,5	20.482,8	142.970
4	20,9	19.861,6	164.454,1
5	30,2	34.478,1	132.494,2
6	45,4	51.827,5	226.485,2
7	22,5	21.469,5	193.108,4
8	16,2	15.451,2	128.708,6

Para os valores médios da interação tripla dos fatores avaliados, para os teores de carbono seguem na tabela abaixo (tabela 14).

Tabela 14 – Desdobramento da interação entre os fatores avaliados para estoque de carbono por árvore

Idade	Clone 1		Clone 2	
	Plano	Encosta	Plano	Encosta
	----- kg -----			
6 anos	34,03 a	20,63 b	30,17 a	45,35 a
5 anos	21,51 a	20,85 a	22,54 a	16,22 a

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

A análise de variância para o carbono total por árvore indicou efeito significativo dos fatores clone ($p = 0,0144$) e idade ($p < 0,01$), bem como das interações clone $\times$ idade, clone $\times$ declividade e da interação tripla clone $\times$ idade $\times$ declividade. A declividade isoladamente não apresentou efeito significativo ($p = 0,3319$). O coeficiente de variação foi de 18,72%, valor considerado adequado para experimentos florestais.

A significância da interação tripla indica que o comportamento dos clones em relação ao acúmulo de carbono depende simultaneamente da idade de avaliação e da condição de

declividade do terreno, tornando necessária a interpretação por meio do desdobramento das interações.

No desdobramento da interação clone dentro de cada combinação de idade e declividade, observou-se diferença significativa apenas na condição correspondente a idade 6 anos e declividade encosta, em que o clone 2 apresentou maior acúmulo de carbono por árvore (45,35 kg) em comparação ao clone 1 (20,63 kg). Nas demais combinações de fatores, não foram observadas diferenças estatísticas entre os clones.

A que apresentou menor carbono por hectare foi o tratamento 8 (15.451,2 (kg/ha)), que tem o clone 2, declividade encosta e idade de 5 anos. O que confirma o quanto é importante a qualidade do manejo florestal, já que o maior valor por hectare foi o mesmo clone e declividade igual com (51.827,45 (kg/ha) um ano a mais.

A análise do efeito da declividade mostrou diferenças significativas apenas para determinadas combinações de clone e idade, evidenciando que o relevo pode influenciar o crescimento e a alocação de biomassa das árvores dependendo das condições genéticas e temporais do plantio.

Esses resultados indicam que o acúmulo de carbono em plantações florestais é fortemente influenciado pela interação entre fatores genéticos, ambientais e tempo de maturação. Este resultado evidencia a importância da escolha adequada de clones e da consideração das condições de relevo para maximizar a produção de biomassa e o sequestro de carbono.

4.6 Implicações Silviculturais dos Resultados

O acúmulo de carbono em povoamentos florestais está diretamente relacionado ao crescimento da biomassa vegetal, sendo influenciado por fatores genéticos, ambientais e silviculturais. Segundo Wink (2009), o estoque de carbono em plantações de eucalipto apresenta relação direta com o incremento da biomassa das árvores e com as condições ambientais do sítio, evidenciando a importância do ambiente de cultivo para o desempenho produtivo e para a capacidade de sequestro de carbono das florestas plantadas.

Os teores de carbono observados neste estudo variaram entre 42% e 53% nos diferentes compartimentos avaliados. Esses resultados estão em conformidade com a literatura para espécies do gênero *Eucalyptus*, nas quais o teor de carbono da biomassa lenhosa tende a apresentar baixa variação entre tratamentos, idades ou materiais genéticos. De acordo com Brand (2010), a composição química da madeira mantém proporções relativamente estáveis de

carbono, sendo frequente a adoção do valor médio de aproximadamente 49% para materiais lenhosos.

Resultados semelhantes foram encontrados por Santos et al. (2012), que observaram teores variando entre 45,81% e 48,59% em espécies de *Eucalyptus spp.*. Da mesma forma, Araujo et al. (2020) registraram valores entre 44,87% e 44,99%, corroborando os resultados encontrados neste trabalho. Esses dados demonstram que, mesmo diante de diferenças edafoclimáticas e silviculturais, o teor de carbono da biomassa lenhosa tende a permanecer relativamente constante.

Além disso, Araujo et al. (2020) destacam que a biomassa florestal apresenta comportamento inversamente proporcional ao espaçamento entre plantas. No referido estudo, foram avaliados espaçamentos de até oito metros, sendo observado que maiores espaçamentos reduziram o acúmulo de biomassa por área. Tal comportamento também condiz com os resultados obtidos neste trabalho, no qual foram avaliados espaçamentos menores, favorecendo maior densidade populacional e, conseqüentemente, maior acúmulo de biomassa e carbono por hectare.

Outro fator relevante no desenvolvimento florestal é a declividade do terreno. Conforme discutido por Garcia et al. (2020), a inclinação do relevo interfere diretamente na disponibilidade hídrica, profundidade efetiva do solo, drenagem e estabilidade do substrato. Esses fatores condicionam o estabelecimento e o desenvolvimento das espécies vegetais, podendo favorecer ou limitar o crescimento das árvores. Dessa forma, diferentes classes de declividade resultam em alterações na estrutura da vegetação e na produtividade dos povoamentos florestais, tornando o relevo um importante fator ambiental na dinâmica ecológica das paisagens naturais e agrícolas.

No cultivo de eucalipto, fatores bióticos também exercem influência significativa sobre a produtividade. Segundo a Santarosa (2014), a ocorrência de pragas-insetos, como formigas cortadeiras, psilídeos, lagartas desfolhadoras e broqueadores, além de agentes patogênicos causadores de doenças foliares e podridões, interfere diretamente nos processos fisiológicos da planta. Esses organismos reduzem a área foliar disponível para fotossíntese, comprometendo o crescimento, o volume de madeira produzido e a massa seca acumulada.

Além dos fatores bióticos, fatores abióticos também exercem forte influência sobre a biomassa e o estoque de carbono. Meneses et al. (2015) relatam que variáveis ambientais, como disponibilidade hídrica, fertilidade do solo, temperatura e radiação solar, afetam diretamente o crescimento das árvores e a produção de biomassa. Os autores ainda destacam que a idade das

árvores influencia significativamente a densidade básica da madeira, assim como fatores edáficos relacionados às características físicas e químicas do solo.

Conforme relatado por Caldeira et al. (2020), a idade do povoamento exerce influência direta sobre o incremento volumétrico e a produtividade do eucalipto, uma vez que o crescimento das árvores promove maior acúmulo de biomassa e incremento do volume de madeira ao longo do ciclo florestal. Os autores observaram produtividade média de $69 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ aos sete anos de idade, demonstrando que o desenvolvimento do povoamento está diretamente relacionado ao aumento da produção florestal.

Os valores de densidade básica encontrados neste estudo apresentaram comportamento semelhante aos relatados por Borges (2019), que obteve médias variando entre 0,400 e 0,600 g/cm^3 para madeira de eucalipto. Essa proximidade entre os resultados reforça a confiabilidade dos dados apresentados neste trabalho e evidencia que os valores observados estão dentro da faixa normalmente encontrada para o gênero *Eucalyptus*.

Conforme ressaltado por Silva (2022), os aspectos edafoclimáticos exercem influência direta sobre a produtividade florestal, demonstrando que a escolha do material genético, isoladamente, não garante elevados níveis de produção. A variabilidade genética observada entre progênies de *Eucalyptus* demonstra o potencial do melhoramento genético para obtenção de materiais mais produtivos, adaptados e com melhores características silviculturais.

As empresas de base florestal possuem papel estratégico na mitigação das mudanças climáticas, uma vez que as florestas atuam como importantes sumidouros de carbono, promovendo a captura e armazenamento de CO_2 atmosférico. Segundo o estudo de Nunes et al. (2020), as florestas são uma das formas mais eficazes de contribuir para a mitigação climática, além de possibilitar aplicações econômicas relacionadas aos serviços ambientais e créditos de carbono.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que os povoamentos comerciais de *Eucalyptus* spp. avaliados apresentam elevado potencial para acúmulo de

biomassa e para o sequestro e armazenamento de carbono. Os valores estimados de carbono por árvore, por hectare e por tratamento demonstram que esses plantios podem contribuir de forma significativa para estratégias de mitigação das mudanças climáticas, além de agregarem valor econômico ao setor florestal.

Verificou-se que o acúmulo de carbono é influenciado de maneira significativa pela interação entre material genético, ano de plantio e condições de declividade, evidenciando a importância da relação genótipo $\times$ ambiente.

Os teores de carbono orgânico total apresentaram baixa variação entre os tratamentos e compartimentos da árvore, mantendo-se dentro dos padrões reportados na literatura, o que confere confiabilidade às estimativas realizadas. Já as variáveis dendrométricas e de biomassa demonstraram maior sensibilidade às condições ambientais e ao material genético, influenciando diretamente os estoques finais de carbono.

A maior eficiência no acúmulo de biomassa e carbono foi observada em povoamentos mais velhos (6 anos de idade), com o clone 2 (CO 1407), sob condição de encosta, evidenciando que esse material genético fornece maior flexibilidade para desenvolvimento em condições adversas.

A escolha do material genético é um dos principais fatores que influenciam a produtividade florestal e o potencial de acúmulo de carbono em povoamentos de eucalipto. Diferentes espécies, híbridos e clones apresentam características fisiológicas e genéticas distintas, que determinam sua capacidade de crescimento, adaptação às condições ambientais e produção de biomassa. Dessa forma, a seleção de materiais genéticos mais produtivos pode favorecer maiores estoques de carbono ao longo do ciclo de desenvolvimento da floresta.

Além do material genético, a idade do povoamento exerce influência direta sobre o estoque de carbono, uma vez que o crescimento das árvores promove o aumento da biomassa e, conseqüentemente, da quantidade de carbono armazenada. Observou-se que o maior e o menor estoque de carbono foram registrados em tratamentos com o mesmo material genético e a mesma condição de declividade, diferindo apenas quanto à idade das árvores. Esse resultado evidencia a importância da idade como fator determinante no acúmulo de carbono em povoamentos de eucalipto.

Assim, os resultados reforçam a relevância do manejo adequado e da escolha criteriosa de clones em plantios comerciais, tanto para fins produtivos quanto ambientais. Além disso, destacam o potencial desses sistemas para inserção em mecanismos de mercado de carbono,

como o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), contribuindo para a sustentabilidade do setor florestal.

Por fim, recomenda-se a realização de estudos futuros que considerem diferentes idades de corte, espaçamentos e condições edafoclimáticas, visando aprimorar as estimativas de biomassa e carbono e ampliar o entendimento sobre o comportamento desses povoamentos ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

ABIMCI. **3º WoodTrade Brazil avalia mercado de produtos de madeira**. 2019. Disponível em: <https://abimci.com.br/3o-woodtrade-brazil-avalia-mercado-de-produtos-de-madeira/>. Acesso em: 2 maio 2026.

AGÊNCIA BRASIL. **Agência Brasil explica o que é e como funciona o mercado de carbono**. 4 out. 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-10/agencia-brasil-explica-o-que-e-e-como-funciona-o-mercado-de-carbono>. Acesso em: 2 maio 2026.

ALAGOAS. Alagoas expande áreas de florestas plantadas com eucalipto. *Agência Alagoas*, Maceió, 18 ago. 2025. Disponível em: <https://alagoas.al.gov.br/noticia/alagoas-expande-areas-de-florestas-plantadas-com-eucalipto>. Acesso em: 27 jun. 2026.

ALAGOAS. Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio (SEPLAG). **Mapas de caracterização territorial**. 2021. Disponível em: <https://dados.al.gov.br/catalogo/hr/dataset/mapas-de-caracterizacao-territorial/resource/1996d928-00f5-4028-8a03-8fe731563798>. Acesso em: 2 maio 2026.

ALAGOAS. Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio (SEPLAG). Solos (2ª edição). **Mapas de caracterização territorial**. 2021. Disponível em: <https://dados.al.gov.br/catalogo/am/dataset/mapas-de-caracterizacao-territorial/resource/ec00b15f-38c9-4ec8-85fa-f93d89f8d7b8>. Acesso em: 2 maio 2026.

APCER. Certificação FSC®: **A importância do consumo sustentável: entrevista com Daniela Vilela, diretora-executiva do FSC Brasil**. 2022. Disponível em: <https://apcergroup.com/pt-br/noticias-e-destaques/3205/certificacao-fsc%C2%AE-a-importancia-do-consumo-sustentavel-entrevista-com-daniela-vilela%2C-diretora-executiva-do-fsc-brasil>. Acesso em: 2 maio 2026.

ARAUJO, Emmanoella Costa Guaraná et al. Determinação do teor de carbono orgânico total em amostra vegetal pelo método volumétrico com diferentes volumes de ácido sulfúrico. **BIOFIX Scientific Journal**, Curitiba, v. 5, n. 1, p. 50-53, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67939>.

ARAUJO, Emmanoella Costa Guaraná; SILVA, Thiago Cardoso; ROCHA, Márcio Pereira da; SANQUETTA, Carlos Roberto. Estoque de carbono na madeira de Eucalyptus: relação material genético x espaçamento entre árvores. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 14, n. 2, p. 505-513, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n2e7998>.

ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; PROTASIO, T. P.; GOULART, S. L. Modelagem da biomassa e do estoque de carbono em plantas jovens de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 225-233, 2015.

BEZERRA NETO, Egídio; BARRETO, Levy Paes. Análises químicas e bioquímicas em plantas. Recife: **Editora Universitária da UFRPE**, 2011. 261 p.

BRAND, Martha Andreia. *Energia de biomassa florestal*. **Rio de Janeiro: Interciência**, 2010. 114 p. ISBN 978-85-7193-244-9.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nºs 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012, 6.385, de 7 de dezembro de 1976, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 12 dez. 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-15042-11-dezembro-2024-796690-publicacaooriginal-173745-pl.html>. Acesso em: 2 maio 2026.

BRASIL. Serviço Florestal Brasileiro. **Florestas naturais**. Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF). Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/temas-florestais/recursos-florestais/florestas-naturais>. Acesso em: 2 maio 2026.

BRIANEZI, Daniel et al. Balanço de carbono em monocultivo de eucalipto com diferentes arranjos espaciais. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 9, n. 1, p. 27-33, 2019.

CALDEIRA, Dany Roberta Marques et al. Produtividade atingível de eucalipto em diferentes ciclos climáticos para o estado de Rondônia. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 215, p. 1-17, nov. 2020. Disponível em: IPEF. Acesso em: 25 maio 2026

CARVALHO, Renata Reis de. Biomassa e nutrientes em um povoamento de Eucalyptus urograndis estabelecido em solo sujeito a arenização no sul do Brasil. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/832/2020/08/Renata-Reis-de-Carvalho_Disserta%C3%A7%C3%A3o-de-Mestrado.pdf. Acesso em: 2 maio 2026.

EMBRAPA. **Eucalipto**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/florestas/eucalipto>. Acesso em: 2 maio 2026.

EMBRAPA. **Finalidade da produção. Agência de Informação Tecnológica.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/eucalipto/pre-producao/escolha-do-material-genetico/finalidade-da-producao>. Acesso em: 2 maio 2026.

FOREST STEWARDSHIP COUNCIL (FSC). **Comparando os padrões do mercado de carbono e os padrões de manejo florestal.** Disponível em: <https://br.fsc.org/br-pt/newsfeed/comparando-os-padroes-do-mercado-de-carbono-e-os-padroes-de-manejo-florestal>. Acesso em: 2 maio 2026.

FOREST STEWARDSHIP COUNCIL (FSC). **FSC e mudanças climáticas.** Disponível em: <https://br.fsc.org/br-pt/valor-do-fsc/fsc-e-mudancas-climaticas>. Acesso em: 2 maio 2026.

FREITAS, J. V. de; FERREIRA, M. C. Secagem de folhas de eucalipto (*Corymbia citrodora*) em secador tipo cesto rotativo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. Anais [...]. **São Paulo: Blucher**, 2015. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/chemicalengineeringproceedings/cobeq2014/0730-24263-172526.pdf>. Acesso em: 2 maio 2026.

GARCIA, Y. M. et al. Declividade e potencial para mecanização agrícola da bacia hidrográfica do Ribeirão Pederneiras - Pederneiras/SP. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 14, n. 1, p. 62–72, 2020.

GARSIDE, M. Global leading wood product importing countries 2023, based on value. **Statista**, 2025. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1617142/global-leading-wood-product-importing-countries-based-on-value/>. Acesso em: 2 maio 2026.

GATTO, Alcides et al. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500015>.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Produtividade de plantações de eucalipto manejadas nos sistemas de alto fuste e talhadia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 103, p. 75-87, 2014.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA (IPAM). **O que é e como funciona o mercado de carbono?** Disponível em: <https://ipam.org.br/cartilhas-ipam/o-que-e-e-como-funciona-o-mercado-de-carbono/>. Acesso em: 2 maio 2026.

JESUS, Daiana Souza de; BORGES, Rafael Nascimento; SILVA, Jonas Santos. Densidade básica e dimensões de fibra de um clone de eucalipto cultivado em diferentes locais. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. e26484, 2019. DOI: 10.35977/0104-1096.cct2019.v36.26484. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/cct/article/view/26484>. Acesso em: 27 jun. 2026.

KAISER, Charlotte. 5 ways sustainable forestry can support climate action, development and biodiversity. **World Economic Forum**, 23 abr. 2024. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2024/04/sustainable-forestry-climate-action-development-biodiversity/>. Acesso em: 2 maio 2026.

LACCLAU, Jean-Paul et al. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations: main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1771–1785, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010>

LACERDA, Matheus Souza. Plantio de eucalipto e o serviço ecossistêmico de captura e armazenamento de carbono. 2020. 59 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) – **Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia**, 2020. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/teseserver/api/core/bitstreams/196d7bf2-b877-456c-80da-4c682075cb2c/content>. Acesso em: 2 maio 2026.

MARTINI, Augusto Jerônimo. O plantador de eucaliptos: a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade. 2004. 320 f. Dissertação (Mestrado em História Social) — **Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2004.

MARTINS, Matheus Teixeira; COSTA, Emanuel Arnoni; MARANGON, Gabriel Paes. Estimativas volumétricas em plantios de eucalipto para duas mesorregiões do Rio Grande do Sul. **BIOFIX Scientific Journal**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 28-36, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5380/biofix.v6i1.75708>.

MENESES, Vivian Amaral et al. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 101-116, 2015.

NORONHA, Albiane Borba. Análises de seis modelos para estimativa do potencial erosivo das chuvas aplicados ao município de Atalaia-AL. 2021. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – **Universidade Federal de Alagoas**, Campus Arapiraca, Arapiraca, 2021.

NUNES, L. J. R.; MEIRELES, C. I. R.; GOMES, C. J. P.; RIBEIRO, N. M. C. A. Forest contribution to climate change mitigation: management oriented to carbon capture and storage. **Climate**, v. 8, n. 2, p. 21, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2225-1154/8/2/21>.

OLIVEIRA, Rudson Silva et al. Estoque de carbono e energia em plantios de *Eucalyptus* na região Norte do Brasil. **Revista Agroecossistemas**, v. 12, n. 1, p. 67, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18542/ragros.v12i1.8174>.

ORELLANA, Bruna Bárbara Maciel Amoras. Utilização de resíduos de biomassa do Distrito Federal para fins energéticos. 2019. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, **Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília**, Brasília, DF, 2019. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/35299/1/2019_BrunaB%C3%A1rbaraMacielAmorasOrellana.pdf. Acesso em: 2 maio 2026.

PMARKETRESEARCH. **Solid wood lumber market**. Disponível em: <https://pmarketresearch.com/chemi/solid-wood-lumber-market/>. Acesso em: 2 maio 2026.

PEDROSA, T. D.; MASCARENHAS, A. R. P.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M. Estimativa da biomassa em um plantio de *Eucalyptus grandis* na região Centro-Oeste. **Scientia Plena**, Aracaju, v. 9, n. 5, 2013. Disponível em: <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/1248>. Acesso em: 27 jun. 2026.

RAVULA, Rohith et al. Carbon sequestration potential of Eucalyptus plantations in central agroclimatic zone of Telangana State. **Indian Journal of Agroforestry**, v. 24, n. 2, p. 76–81, 2022.

REIS, C. A. F. et al. *Corymbia citriodora*: estado da arte de pesquisas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2013. (Embrapa Florestas. Documentos, 255). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/974349/1/Doc.255ReisAinfo1.pdf>. Acesso em: 02 maio 2026.

RIBEIRO, Sabina Cerruto et al. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma floresta madura no município de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, n. 5, p. 917–926, 2009.

RODRIGUES, Gelze Serrat de Souza Campos et al. Eucalipto no Brasil: expansão geográfica e impactos ambientais. **Uberlândia: Composer**, 2021. 178 p.

ROSIM, Camila Cristina. Eficiência de utilização de nutrientes em clones de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* e relação com a produtividade de biomassa. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – **Universidade Estadual Paulista**, Botucatu, 2013. Disponível em: Repositório Institucional da UNESP. Acesso em: 27 jun. 2026.

SANTANA, Reynaldo Campos; BARROS, Nairam Felix de; LEITE, Hélio Garcia; COMERFORD, Nicholas Brian; NOVAIS, Roberto Ferreira de. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000400011>.

SANTAROSA, Emiliano; PENTEADO JUNIOR, Joel Ferreira; GOULART, Ives Clayton Gomes dos Reis. Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda. Brasília, DF: **Embrapa**, 2014. 138 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1010933/1/ApostilaSerieTTEucalipto.pdf>. Acesso em: 2 maio 2026.

SANTOS, Alane Silva de Aquino dos et al. Estoques de carbono no solo após o plantio de eucalipto em substituição ao cultivo da cana-de-açúcar. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 16, n. 5, p. 2253-2269, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.5-018>.

SANTOS, Larissa Carvalho et al. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000500019>.

SARTÓRIO, Ian Pereira. Avaliação e modelagem do crescimento de florestas energéticas de eucalipto plantadas em diferentes densidades. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – **Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, 2014.

SILVA, Carlos Alberto et al. Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus spp.* **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 135-146, 2015. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr105/cap13.pdf>. Acesso em: 28 maio 2026.

SILVA, Vinicius Evangelista et al. Influência do clima na produtividade e resposta à seca do eucalipto e uma proposta de maximização da produtividade de madeira em função dos atributos do solo no Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 523-547, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509832690>.

TRUGILHO, Paulo Fernando. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000500005>.

VIEIRA, Adriana Carvalho Pinto et al. O mercado regulado de carbono no Brasil. **Estudos Avançados**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202539114.009>.

WINK, C.; REINERT, D. J.; TORNQUIST, C. G.; LIBERALESSO, E.; CAVALLI, J. P.; SILVA, R. F. A idade das plantações de *Eucalyptus sp.* influencia os estoques de carbono no solo e na serapilheira, **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 271-280, 2013.

WINK, Charlotte. Estoque de carbono em plantações de *Eucalyptus sp.* implantados em campo nativo. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – **Universidade Federal de Santa Maria**, Santa Maria, 2009. Disponível em: https://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Charlotte_Wink_Dissertacao.pdf. Acesso em: 02 maio 2026.