



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE GURUPI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E
AMBIENTAIS**

GISELLE GOMES DE SOUSA

**DESEMPENHO MORFOFISIOLÓGICO E QUALIDADE DE MUDAS DE *Corymbia
citriodora* E *Eucalyptus urophylla* SUBMETIDAS À APLICAÇÃO DE
BIOFERTILIZANTES MICROBIANOS**

**Gurupi/TO
2026**

Giselle Gomes de Sousa

Desempenho morfofisiológico e qualidade de mudas de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* submetidas à aplicação de biofertilizantes microbianos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de Mestra em Ciências Florestais e Ambientais.

Orientador: Dr. Aloisio Freitas Chagas Júnior

**Gurupi/TO
2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

G633d Gomes de Sousa, Giselle.

Desempenho morfofisiológico e qualidade de mudas de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* submetidas à aplicação de biofertilizantes microbianos. / Giselle Gomes de Sousa. – Gurupi, TO, 2025.

80 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Gurupi - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Ciências Florestais e Ambientais, 2025.

Orientador: Aloisio Freitas Chagas Júnior

1. Biofertilizantes microbianos;. 2. Crescimento inicial. 3. Índice de qualidade de Dickson. 4. Sistema radicular. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Giselle Gomes de Sousa

Desempenho morfofisiológico e qualidade de mudas de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* submetidas à aplicação de biofertilizantes microbianos

Dissertação apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Gurupi, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, onde foi avaliada para a obtenção do título de Mestra e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 22 / 06 / 2026

Banca Examinadora

Prof. Dr. Aloisio Freitas Chagas Júnior, UFT

Prof. Dr. Jader Nunes Cachoeira, UFT

Prof. Járison Cavalcante Nunes, UEMASUL

À minha família. Aos meus pais e irmãos, que plantaram em mim as sementes da honra, do caráter e da busca pelo saber. E ao meu esposo, Divino Lira, e à minha filha, Gabriela Gomes, que regaram esse propósito diariamente com amor, paciência e renúncia. Dedico esta conquista à nossa história, pois nenhuma grande vitória se ergue sem uma base sólida.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Tocantins (UFT) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais (PPGCFA), pela oportunidade de aperfeiçoamento acadêmico e pelo espaço de crescimento científico.

Ao meu orientador, Professor Dr. Aloísio Freitas Chagas Júnior, pela condução firme, paciência e pelo compartilhamento de seu vasto conhecimento. Sua orientação foi fundamental para que esta pesquisa ganhasse o rigor e a profundidade necessários.

Aos colegas de mestrado e técnicos, pelo auxílio mútuo, parceria nas rotinas de pesquisa e pela convivência enriquecedora ao longo desta jornada.

À minha família, em especial ao meu esposo, Divino Lira, e à minha filha, Gabriela Gomes, pelo amor incondicional, pela compreensão nas horas de dedicação aos estudos e por serem o meu porto seguro.

A Deus, pela força, discernimento e saúde para superar os desafios e concluir este ciclo com resiliência.

A todos que, com partilha, incentivo ou silêncio respeitoso, somaram forças para que este projeto se tornasse realidade, manifesto a minha mais sincera e profunda gratidão.

RESUMO

A produção de mudas florestais de alta qualidade é determinante para o sucesso de plantios comerciais e sistemas silviculturais sustentáveis, sendo a fase de viveiro essencial para o estabelecimento inicial das plantas. Este estudo avaliou o desempenho morfológico, biométrico e fisiológico de mudas de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* submetidas à aplicação de diferentes formulações de biofertilizantes microbianos, isoladas e em mistura, em comparação ao manejo convencional sem inoculação. Os experimentos foram conduzidos em viveiro, em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5×2 , composto por cinco tratamentos (BARVAR+N, BARVAR+P, BARVAR+K, MIX NPK e controle) e duas épocas de avaliação (30 e 60 dias). Foram avaliados parâmetros morfológicos, biométricos e fisiológicos, incluindo altura, diâmetro do coleto, volume de raiz, massas secas da parte aérea, da raiz e total, índice de lignificação e índice de qualidade de Dickson (IQD). Em ambas as espécies, observou-se crescimento significativo entre 30 e 60 dias, com maior sensibilidade das variáveis biométricas aos tratamentos. Os biofertilizantes específicos BARVAR+K e BARVAR+N proporcionaram os maiores incrementos em volume radicular e acúmulo de biomassa, resultando em mudas com melhor equilíbrio morfofisiológico. Em *C. citriodora*, o BARVAR+K apresentou os maiores valores de massa seca total e IQD, enquanto em *E. urophylla* BARVAR+K e BARVAR+N destacaram-se, com massa seca total de até 0,21 g, volume radicular de até 2,30 mL e IQD máximo de 0,11 aos 60 dias. A análise de correlação indicou que a qualidade das mudas esteve diretamente associada ao acúmulo e à distribuição de biomassa, e não às dimensões morfológicas isoladas. Conclui-se que biofertilizantes microbianos específicos, especialmente BARVAR+K e BARVAR+N, constituem alternativa promissora para a produção de mudas florestais de alta qualidade, embora períodos mais longos de cultivo sejam necessários para a plena expressão da qualidade fisiológica.

Palavras-chaves: Crescimento inicial; Índice de qualidade de Dickson; Produção de mudas; Sistema radicular.

ABSTRACT

The production of high-quality forest seedlings is essential for the success of commercial plantations and sustainable silvicultural systems, with the nursery phase playing a fundamental role in the initial establishment of plants. This study evaluated the morphological, biometric, and physiological performance of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* seedlings subjected to the application of different microbial biofertilizer formulations, applied individually and in combination, compared with conventional management without inoculation. The experiments were conducted in a nursery under a completely randomized design in a 5×2 factorial arrangement, consisting of five treatments (BARVAR+N, BARVAR+P, BARVAR+K, MIX NPK, and a control) and two evaluation periods (30 and 60 days). Morphological, biometric, and physiological parameters were evaluated, including height, root collar diameter, root volume, shoot, root, and total dry mass, lignification index, and Dickson Quality Index (DQI). In both species, significant growth was observed between 30 and 60 days, with biometric variables showing greater sensitivity to the treatments. The specific biofertilizers BARVAR+K and BARVAR+N promoted the greatest increases in root volume and biomass accumulation, resulting in seedlings with improved morphophysiological balance. In *C. citriodora*, BARVAR+K produced the highest total dry mass and DQI values, whereas in *E. urophylla*, BARVAR+K and BARVAR+N showed the best performance, reaching total dry mass values of up to 0.21 g, root volume of up to 2.30 mL, and a maximum DQI of 0.11 at 60 days. Correlation analysis indicated that seedling quality was directly associated with biomass accumulation and distribution rather than with isolated morphological dimensions. It is concluded that specific microbial biofertilizers, especially BARVAR+K and BARVAR+N, constitute a promising alternative for the production of high-quality forest seedlings, although longer cultivation periods are required for the full expression of physiological quality.

Key-words: Initial growth; Dickson Quality Index; Seedling production; Root system.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 - Altura da planta (cm) e diâmetro do coleto (mm) de mudas de <i>C. citriodora</i> submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplantio.....	34
Figura 2 - Volume de raiz (mL) e massas secas da parte aérea (g), da raiz (g) e total (g) de mudas de <i>C. citriodora</i> submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplantio	36
Figura 3 - Relação altura/diâmetro do coleto (HT/DC) e relação massa seca da parte aérea/massa seca da raiz (MSPA/MSR) de mudas de <i>C. citriodora</i> submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplantio.....	38
Figura 4 - Índice de lignificação e índice de qualidade de Dickson (IQD) de mudas de <i>C. citriodora</i> submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplantio	40
Figura 5 - Matriz de correlação de Pearson entre variáveis morfológicas, biométricas e fisiológicas indicadoras do crescimento e da qualidade de mudas de <i>C. citriodora</i>	43
Figura 6 - Altura da planta (cm) e diâmetro do coleto (mm) de mudas de <i>E. urophylla</i> submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplantio.....	57
Figura 7 - Volume de raiz (mL) e massas secas da parte aérea (g), da raiz (g) e total (g) de mudas de <i>E. urophylla</i> submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplantio	61
Figura 8 - Relação altura/diâmetro do coleto (HT/DC) e relação massa seca da parte aérea/massa seca da raiz (MSPA/MSR) de mudas de <i>E. urophylla</i> submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplantio.....	64
Figura 9 - Índice de lignificação e índice de qualidade de Dickson (IQD) de mudas de <i>E. urophylla</i> submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplantio	66
Figura 10 - Matriz de correlação de Pearson entre variáveis morfológicas, biométricas e fisiológicas indicadoras do crescimento e da qualidade de mudas de <i>E. urophylla</i>	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos avaliados, incluindo sua composição nutricional e os principais microrganismos presentes nos biofertilizantes Barvar [®]	31
Tabela 2 - Resumo da análise de variância para altura da planta (HT) e diâmetro do coleto (DC) de mudas de <i>E. urophylla</i> submetidas a diferentes biofertilizantes microbianos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplântio	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BARVAR+K	Biofertilizante microbiano solubilizador de potássio
BARVAR+N	Biofertilizante microbiano fixador de nitrogênio
BARVAR+P	Biofertilizante microbiano solubilizador de fósforo
CeMAF	Centro de Monitoramento Ambiental e Manejo do Fogo
DC	Diâmetro do coleto (mm)
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
HT	Altura da planta (cm)
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IL	Índice de lignificação
IQD	Índice de Qualidade de Dickson
MIX NPK	Mistura de biofertilizantes N, P e K
MSPA	Massa seca da parte aérea (g)
MSR	Massa seca do sistema radicular (g)
MST	Massa seca total (g)
UFT	Universidade Federal do Tocantins
VR	Volume de raiz (mL)

LISTA DE SÍMBOLOS

%	percentual
°C	graus Celsius
cm	centímetros
cm ³	centímetros cúbicos
g	gramas
kg	quilogramas
kg m ⁻³	quilogramas por metro cúbico
mL	mililitros
mm	milímetros
mS cm ⁻¹	milisiemens por centímetro
p	nível de significância estatística
≤	menor ou igual
≥	maior ou igual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	O setor florestal brasileiro	17
3.2	As espécies <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Eucalyptus urophylla</i> : características, usos e relevância econômica.....	19
3.3	Microrganismos promotores de crescimento e biofertilizantes na silvicultura	22
3.4	Parâmetros morfológicos, biométricos e fisiológicos na avaliação da qualidade de mudas	23
3.5	Tecnologias sustentáveis na produção de mudas e o potencial dos biofertilizantes	25
4	DESEMPENHO MORFOFISIOLÓGICO E QUALIDADE DE MUDAS DE <i>Corymbia citriodora</i> SUBMETIDAS À APLICAÇÃO DE BIOFERTILIZANTES MICROBIANOS.....	27
4.1	INTRODUÇÃO	28
4.2	METODOLOGIA.....	29
4.2.1	Área de estudo.....	29
4.2.2	Delineamento experimental	30
4.2.3	Preparo e aplicação das soluções.....	31
4.2.4	Variáveis analisadas	32
4.2.5	Análises estatísticas	33
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.3.1	Parâmetros morfológicos	33
4.3.2	Parâmetros biométricos	35
4.3.3	Parâmetros fisiológicos.....	39
4.3.4	Correlação de Pearson	42
4.4	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
5	DESEMPENHO MORFOFISIOLÓGICO E QUALIDADE DE MUDAS DE <i>Eucalyptus urophylla</i> SUBMETIDAS À APLICAÇÃO DE BIOFERTILIZANTES MICROBIANOS.....	49

5.1	INTRODUÇÃO	50
5.2	METODOLOGIA.....	51
5.2.1	Área de estudo.....	51
5.2.2	Delineamento experimental	52
5.2.3	Preparo e aplicação das soluções.....	53
5.2.4	Variáveis analisadas	54
5.2.5	Análises estatísticas	56
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.3.1	Parâmetros morfológicos	56
5.3.2	Parâmetros biométricos	61
5.3.3	Parâmetros fisiológicos.....	65
5.3.4	Correlação de <i>Pearson</i>	67
5.4	CONCLUSÃO.....	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

1 INTRODUÇÃO GERAL

O setor de florestas plantadas é um dos pilares da economia florestal brasileira, ocupando aproximadamente 8,1 milhões de hectares e respondendo por mais de 75% da madeira produzida no país, com destaque para os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* (IBÁ, 2025). Esses gêneros sustentam cadeias produtivas estratégicas, como celulose e papel, painéis de madeira, carvão vegetal e biomassa energética, além de gerar milhões de empregos diretos e indiretos no Brasil (IBÁ, 2025). Entre as espécies de maior relevância, *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora* destacam-se pela alta produtividade, ampla adaptabilidade edafoclimática e estabilidade de desempenho em diferentes regiões do país, sendo amplamente utilizadas em plantios comerciais, sistemas clonais e programas de melhoramento genético (Ekonomo *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022).

O êxito desses sistemas florestais depende, em grande parte, da qualidade das mudas produzidas em viveiro, uma vez que características morfológicas, biométricas e fisiológicas adequadas condicionam o estabelecimento inicial, a sobrevivência após o transplântio e o desempenho silvicultural ao longo do plantio (Silva *et al.*, 2022). Parâmetros como altura, diâmetro do coleto, desenvolvimento radicular e acúmulo de biomassa, bem como índices integrativos de qualidade, como o índice de lignificação e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), são amplamente utilizados para estimar o vigor e o potencial produtivo das mudas em campo (Guimarães; Silva; Ferreira, 2024; Silva *et al.*, 2025).

A produção de mudas florestais no Brasil baseia-se majoritariamente na adubação mineral convencional, a qual, apesar de eficiente no curto prazo, enfrenta limitações relacionadas ao alto custo dos fertilizantes, à dependência de insumos importados e às perdas de nutrientes por lixiviação e volatilização (FAO, 2023; Jardim *et al.*, 2024). Uma parte significativa dos fertilizantes aplicados são perdidas ao longo do ciclo produtivo (Wei *et al.*, 2021; Lee; Ku, 2025). Além disso, o manejo exclusivamente mineral simplifica a microbiota rizosférica, restringindo processos naturais de ciclagem de nutrientes e de estímulo ao crescimento vegetal (Tian *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023).

Sendo assim, o uso de biofertilizantes microbianos tem se destacado como alternativa biotecnológica para tornar a produção de mudas florestais mais eficiente e sustentável. Esses microrganismos atuam por diferentes mecanismos, como a fixação biológica de nitrogênio, a solubilização de fósforo e potássio, a produção de fitormônios, a síntese de sideróforos e a modulação do sistema radicular, melhorando o desempenho das mudas, especialmente nas fases

iniciais de desenvolvimento em viveiro (Basu *et al.*, 2021; Chandran; Meena; Swapnil, 2021; Aloo *et al.*, 2022).

Embora os benefícios de microrganismos promotores de crescimento tenham sido demonstrados em diferentes culturas agrícolas e em algumas espécies florestais, ainda são escassos os estudos que avaliam, de forma integrada, o efeito de formulações microbianas específicas contendo microrganismos fixadores de nitrogênio e solubilizadores de fósforo e potássio sobre o desempenho morfológico, biométrico e fisiológico de mudas de *C. citriodora* e *E. urophylla* em condições de viveiro. Além disso, são limitadas as informações sobre a resposta dessas espécies à aplicação isolada e combinada desses biofertilizantes, bem como sobre seus efeitos na qualidade das mudas, representando uma lacuna que limita a adoção dessas tecnologias na produção florestal (Aloo *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2025).

Diante desse contexto, torna-se necessário ampliar o conhecimento sobre o potencial de biofertilizantes microbianos na produção de mudas florestais, buscando identificar formulações capazes de promover maior crescimento, equilíbrio morfofisiológico e qualidade das mudas, contribuindo para sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da aplicação de biofertilizantes microbianos (Barvar[®] N, P, K e sua combinação Mix NPK) sobre o desenvolvimento morfológico, biométrico e fisiológico de mudas de *C. citriodora* e *E. urophylla*, produzidas em viveiro.

2.2 Objetivos específicos

1. Avaliar o crescimento inicial de mudas de *C. citriodora* e *E. urophylla* por meio de parâmetros morfológicos e biométricos, incluindo altura da planta, diâmetro do coleto, volume de raiz e acúmulo de biomassa, em resposta à aplicação de diferentes biofertilizantes microbianos;
2. Determinar os principais índices de qualidade das mudas, com ênfase nas relações altura/diâmetro do coleto (HT/DC) e massa seca da parte aérea/massa seca da raiz (MSPA/MSR), bem como no índice de lignificação (IL) e no índice de qualidade de Dickson (IQD);

3. Analisar as correlações entre variáveis morfológicas, biométricas e fisiológicas, identificando os atributos mais associados à qualidade das mudas de *C. citriodora* e *E. urophylla* na fase de viveiro.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O setor florestal brasileiro

O setor florestal brasileiro ocupa posição estratégica na agenda ambiental e econômica do país, articulando produção de matérias-primas renováveis, geração de emprego e serviços ecossistêmicos de grande escala. Segundo a IBÁ (2025), o Brasil possui 10,5 milhões de hectares de florestas plantadas, dos quais predominam os plantios de *Eucalyptus* e *Pinus*, destinados principalmente às cadeias produtivas de celulose e papel, painéis de madeira, biomassa energética e produtos sólidos de madeira. Além da produção florestal, as empresas do setor mantêm aproximadamente 7 milhões de hectares de áreas destinadas à conservação ambiental e 10,7 milhões de hectares certificados por sistemas de manejo florestal sustentável. O setor também responde pela geração de cerca de 2,8 milhões de empregos diretos e indiretos e por US\$ 15,7 bilhões em exportações, evidenciando sua relevância para a economia nacional e sua contribuição para o desenvolvimento sustentável e para a mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono e do fornecimento de produtos renováveis (IBÁ, 2025).

Do ponto de vista econômico, a silvicultura e as indústrias de base florestal apresentam participação relevante no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Analisando a evolução de 2000 a 2019, Oliveira *et al.* (2023) mostraram que o PIB real do país apresentou taxa de crescimento positiva de 3,51%, enquanto a taxa associada aos produtos da silvicultura foi negativa, reflexo dos efeitos de crises financeiras e mudanças mercadológicas sobre o setor. Ainda assim, estudos recentes apontam que, em 2019, o segmento florestal respondeu por dezenas de bilhões de reais em valor adicionado, representando parcela expressiva do PIB industrial e garantindo superávit na balança comercial por meio das exportações de celulose, papel, painéis e outros produtos florestais (Delatorre *et al.*, 2025; Chauvet *et al.*, 2025).

A dimensão social desse setor também é expressiva. Delatorre *et al.* (2025) estimam que, em 2022, o setor florestal gerou aproximadamente 2,6 milhões de empregos diretos e indiretos, com forte impacto em municípios de médio e pequeno porte, onde a silvicultura se consolidou como importante alternativa de diversificação econômica. Na perspectiva da bioeconomia, Silva e Silva (2024) mostram que a cadeia florestal produz volumosos estoques de biomassa e resíduos com potencial para geração de produtos ecológicos, como bioenergia, biocombustíveis, bioprodutos e insumos verdes, ampliando oportunidades de agregação de valor e de redução da dependência de matérias-primas fósseis.

Em Minas Gerais, estado que lidera a área de florestas plantadas no Brasil, a silvicultura ocupava cerca de 0,66% do território (387.717 ha) em 1985, aumentando 380% e alcançando aproximadamente 1,47 milhão de hectares em 2022 (Chauvet *et al.*, 2025). Esse crescimento ocorreu predominantemente sobre áreas de pastagens e vegetação nativa em diferentes estágios de uso, sobretudo em terras com alta ou muito alta aptidão para a silvicultura, sem competição direta com áreas de agricultura intensiva.

No Tocantins, a silvicultura apresentou expressiva expansão nas últimas décadas, impulsionada principalmente pelos plantios de *Eucalyptus*. O estado passou de pequenos plantios isolados, iniciados na década de 1970, para uma área acumulada de aproximadamente 106 mil hectares em 2013, sendo cerca de 89% composta por eucalipto. Esse crescimento foi favorecido pelas condições edafoclimáticas, disponibilidade de terras, localização estratégica e avanço das tecnologias de produção, consolidando o Tocantins como uma nova fronteira florestal do país. Além disso, estudos realizados no extremo norte do estado evidenciaram crescimento superior a 100% das áreas de florestas plantadas entre 2007 e 2017, demonstrando a rápida expansão da atividade e seu potencial para atender às demandas dos setores de celulose, energia e produtos florestais (Carvalho *et al.*, 2019; Paz *et al.*, 2020).

No contexto da intensificação sustentável, tecnologias de manejo nutricional têm sido incorporadas ao setor florestal brasileiro. Cunha *et al.* (2021) destacam que os adubos de liberação lenta, já consolidados na fase de produção de mudas, permitem maior eficiência no uso de nutrientes, redução de perdas por lixiviação e volatilização, além de diminuição de custos com mão de obra e insumos. Essas estratégias se somam à valorização de resíduos florestais na geração de bioenergia e bioprodutos (Delatorre *et al.*, 2025; Silva; Silva, 2024).

Dentro desse cenário, espécies de rápido crescimento como *Eucalyptus* e *Corymbia* constituem a base produtiva das florestas plantadas no país. Plantios desses gêneros têm sido apontados como importantes aliados na conservação de florestas nativas, ao suprirem a demanda industrial por madeira e reduzir a pressão sobre remanescentes naturais (Costella *et al.*, 2025). Melo *et al.* (2024) demonstraram que espécies não tradicionais de *Eucalyptus* e *Corymbia* apresentam diferentes respostas ao déficit hídrico, com *C. citriodora* subsp. *variegata* exibindo elevados valores de biomassa de fuste, mesmo em ambientes mais secos, indicando grande potencial para expansão em regiões sujeitas às mudanças climáticas.

Especificamente, *Corymbia citriodora* tem se consolidado como espécie-chave na interface entre o setor madeireiro, a produção de celulose e a indústria de óleos essenciais. Estudos genômicos mostram que a espécie mantém altas taxas de crescimento, graças à expansão de famílias gênicas associadas à biossíntese de terpenos, resistência a patógenos e

formação de ceras foliares, o que favorece a adaptação a estresses bióticos e abióticos (Healey *et al.*, 2021). Complementarmente, Rocha *et al.* (2024) verificaram que as ceras foliares de *C. citriodora* apresentam alta hidrofobicidade e composição química sensível às variações climáticas, o que mostra o potencial dessa espécie como modelo de adaptação ecológica dentro da família Myrtaceae.

Paralelamente, práticas baseadas em microrganismos promotores de crescimento têm ganhado espaço como estratégia de intensificação sustentável no viveiro florestal. Oliveira *et al.* (2024a) demonstraram que a inoculação de sementes de *C. citriodora* com bactérias endofíticas produtoras de ácido indolacético (AIA), como *Priestia megaterium*, *Exiguobacterium sibiricum*, *Pantoea vagans* e *Bacillus* sp., melhora a qualidade fisiológica das sementes e aumenta altura, diâmetro do coleto e massa seca de mudas, sem prejuízo à germinação. Em miniestacas do híbrido *C. citriodora* × *C. torelliana*, a combinação de endófitos com ácido indolbutírico sintético (IBA) proporcionou incrementos de 29–36% no enraizamento e de 27–34% em altura, além de maior biomassa de raízes e parte aérea (Oliveira *et al.*, 2024b). Resultados semelhantes foram obtidos por Ribeiro *et al.* (2021), que comprovaram a eficiência de *Trichoderma* spp. e *Bacillus subtilis* em promover o crescimento inicial e melhorar o Índice de Qualidade de Dickson de mudas de *C. citriodora*.

Essas inovações dialogam diretamente com a visão de bioeconomia e de uso racional de insumos no setor florestal brasileiro. Enquanto adubos de liberação lenta (Cunha *et al.*, 2021) otimizam a eficiência da adubação mineral, o uso de microrganismos benéficos, como endófitos e rizobactérias, contribui para reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos e reguladores de crescimento, além de potencialmente melhorar a resistência a estresses e a fitossanidade das mudas. Em conjunto, avanços em genética florestal, manejo nutricional e biotecnologias de produção de mudas fortalecem a competitividade do setor, ao mesmo tempo em que o alinham às exigências de sustentabilidade, economia circular e serviços ambientais discutidas por Delatorre *et al.* (2025) e Silva e Silva (2024).

3.2 As espécies *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*: características, usos e relevância econômica

Corymbia citriodora (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson, pertencente à família Myrtaceae, destaca-se como uma das árvores mais versáteis e economicamente importantes utilizadas em sistemas florestais comerciais e bioindustriais. Originária da Austrália, apresenta alta plasticidade ecológica, crescimento rápido, tolerância a déficits hídricos e adaptação a

diferentes tipos de solo, o que impulsionou sua expansão para regiões tropicais e subtropicais ao redor do mundo, incluindo o Brasil (Perry; Wangchuk, 2023). Estudos indicam que a espécie mantém desempenho satisfatório mesmo sob cenários climáticos futuros mais severos, destacando-se como uma das mais resilientes do complexo *Eucalyptus-Corymbia* frente ao aumento da temperatura e à redução da disponibilidade hídrica na América do Sul (Aparecido *et al.*, 2025).

Eucalyptus urophylla S.T. Blake, também pertencente à família Myrtaceae, é uma das espécies mais importantes e amplamente cultivadas nos sistemas florestais comerciais tropicais. Originária das ilhas de Sunda, na Indonésia, a espécie apresenta elevado vigor inicial, rápido crescimento, ampla adaptabilidade edafoclimática e boa tolerância a estresses abióticos, especialmente déficit hídrico e solos de baixa fertilidade, características que favoreceram sua ampla introdução e consolidação nos plantios florestais brasileiros (Ekono *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022). No Brasil, *E. urophylla* destaca-se como base genética de programas de melhoramento e na formação de híbridos comerciais, sobretudo com *E. grandis*, sendo amplamente utilizada pela indústria de celulose, energia e madeira sólida. Estudos recentes indicam que a espécie apresenta elevada estabilidade produtiva sob diferentes cenários climáticos e bom desempenho fisiológico frente ao aumento da temperatura e à variabilidade hídrica, consolidando-se como uma das espécies mais resilientes do gênero *Eucalyptus* em ambientes tropicais e subtropicais da América do Sul (Silva *et al.*, 2022; Aparecido *et al.*, 2025).

No setor florestal brasileiro, *C. citriodora* possui relevância estratégica devido ao seu uso múltiplo. A madeira apresenta alta densidade, elevada resistência mecânica e excelente durabilidade natural, possibilitando seu emprego em construções civis, postes, mourões e serraria, conforme demonstrado pela análise de propriedades mecânicas realizada por Nogueira *et al.* (2021). De forma complementar, *E. urophylla* destaca-se como uma das espécies mais utilizadas em plantios comerciais no Brasil, sobretudo pela elevada produtividade volumétrica, bom desempenho em ambientes tropicais e ampla participação em programas de melhoramento genético e na formação de híbridos comerciais, como *E. urophylla* × *E. grandis*, amplamente empregados pela indústria de celulose e energia (Silva *et al.*, 2022).

Além do reconhecimento nacional, *C. citriodora* apresenta importância crescente no estado do Tocantins, onde há expansão de plantios comerciais voltados tanto ao uso madeireiro quanto à produção de óleo essencial. Em Dueré-TO, por exemplo, povoamentos manejados pela JAMP Florestal demonstraram elevado rendimento volumétrico e produção diversificada de multiprodutos, incluindo madeira serrada, estacas, esticadores e cavacos (Coelho *et al.*, 2023). Paralelamente, *E. urophylla* tem sido amplamente cultivado no estado e em outras

regiões do Cerrado, destacando-se pela boa adaptação edafoclimática e elevada resposta a práticas de manejo nutricional e biotecnológico em viveiro (Souza *et al.*, 2024).

Outro grande destaque econômico de *C. citriodora* é a produção de óleo essencial, considerado um dos mais comercializados no mundo. Os óleos extraídos de folhas e flores são ricos em compostos como citronelal, citronellyl acetate, transcariofileno, α -pineno, o-cimeno e eudesmol, apresentando alto valor agregado para as indústrias farmacêutica, cosmética, alimentícia e de higiene (Sarma *et al.*, 2021). Esses óleos possuem comprovadas atividades antimicrobianas, antifúngicas, antioxidantes e anti-inflamatórias, sendo estudados como alternativas naturais a herbicidas e fármacos, além de serem classificados como GRAS (“generally regarded as safe”) pela FDA dos Estados Unidos (Sarma *et al.*, 2021).

Sob a perspectiva da produção de mudas e do melhoramento florestal, ambas as espécies têm sido amplamente investigadas. *C. citriodora* apresenta limitações relacionadas ao enraizamento vegetativo, o que restringe a clonagem comercial; contudo, técnicas como miniestacas e uso de mini-túneis têm ampliado o sucesso de propagação do gênero *Corymbia* (Lima *et al.*, 2022). Por sua vez, *E. urophylla* apresenta maior facilidade de propagação e ampla resposta à inoculação com microrganismos promotores de crescimento, com ganhos expressivos em biomassa, desenvolvimento radicular e Índice de Qualidade de Dickson, conforme relatado em estudos recentes com bactérias diazotróficas e solubilizadoras de nutrientes (Ribeiro *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2024).

No contexto energético, *C. citriodora* desponta como espécie altamente competitiva para a produção de carvão vegetal de elevada qualidade. Massuque *et al.* (2023) demonstraram que o carvão dessa espécie apresenta alta densidade aparente ($>400 \text{ kg m}^{-3}$), elevada energia por volume ($>13 \text{ GJ m}^{-3}$) e baixa reatividade, atributos essenciais para uso siderúrgico. Embora *E. urophylla* também seja amplamente utilizado para fins energéticos, especialmente em sistemas de curta rotação, o carvão de *C. citriodora* destaca-se pela maior estabilidade físico-química, tornando-se alternativa estratégica para a substituição parcial do coque mineral e para a redução das emissões de CO_2 (Massuque *et al.*, 2023).

O amplo espectro de usos de *C. citriodora*, madeira estrutural, carvão vegetal de alta performance, óleos essenciais com bioatividade reconhecida, elevada tolerância climática e potencial para tecnologias avançadas de produção de mudas, aliado à alta produtividade, adaptabilidade e importância genética de *E. urophylla*, posiciona ambas as espécies como pilares do setor florestal brasileiro contemporâneo. Essas características atendem simultaneamente às demandas por produtos tradicionais e a mercados emergentes ligados à

bioeconomia, bioinsumos e sustentabilidade, reforçando sua relevância estratégica no manejo florestal moderno (Nogueira *et al.*, 2021; Massuque *et al.*, 2023).

3.3 Microrganismos promotores de crescimento e biofertilizantes na silvicultura

O uso de microrganismos promotores de crescimento de plantas (PGPM) tem ganhado destaque como alternativa sustentável para aumentar o desempenho silvicultural, especialmente em espécies de rápido crescimento como *C. citriodora*. A adoção desses bioinsumos responde tanto às demandas do setor florestal brasileiro por maior produtividade quanto à necessidade de reduzir a dependência de fertilizantes minerais. Os PGPM atuam por mecanismos que incluem solubilização de nutrientes, produção de reguladores de crescimento, aumento da tolerância ao estresse e melhora da arquitetura radicular, elementos essenciais para o estabelecimento de mudas em viveiro (Senkovs *et al.*, 2021; Ferreira; Gatto; Ramos, 2025).

Entre os microrganismos mais eficientes estão bactérias dos gêneros *Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Bradyrhizobium* e *Bacillus*, além de fungos benéficos como os do gênero *Trichoderma*. Esses grupos microbianos desempenham funções complementares: fixam nitrogênio atmosférico, solubilizam fósforo e potássio, degradam compostos orgânicos e modulam respostas fisiológicas das plantas. Estudos revelam que a inoculação isolada dessas cepas é capaz de aumentar significativamente massa seca, altura e vigor de mudas florestais, inclusive em condições de solos tropicais altamente intemperizados (Senkovs *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2024).

Na silvicultura brasileira, o uso desses microrganismos tem sido particularmente relevante em espécies do gênero *Corymbia*, amplamente utilizadas para fins madeireiros, energéticos e produção de óleos essenciais. Caracterizações recentes da madeira de *C. citriodora* reforçam seu alto valor econômico e durabilidade, justificando esforços para aprimorar a produção de mudas de alta qualidade (Nogueira *et al.*, 2021). Além disso, revisões etnofarmacológicas demonstram que o gênero apresenta amplo potencial bioativo, reforçando a importância do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de cultivo (Perry; Wangchuk, 2023).

Nesse contexto, os biofertilizantes comerciais da linha Barvar[®], utilizados no presente estudo, representam uma tecnologia promissora. Formulados com cepas específicas de *Azotobacter vinelandii*, *Pseudomonas putida*, *Pantoea agglomerans*, *Pseudomonas vancouverensis* e *P. koreensis*, esses produtos atuam na fixação biológica de nitrogênio e na solubilização de formas insolúveis de fósforo e potássio. A literatura demonstra que

microrganismos desses gêneros são altamente eficazes em aumentar a disponibilidade de nutrientes e melhorar os parâmetros morfofisiológicos em espécies florestais (Senkovs *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2024).

A coinoculação, combinação de diferentes microrganismos, tem se mostrado ainda mais eficiente em ambientes tropicais. Estudos recentes com *Schizolobium parahyba* demonstraram que a associação entre *Trichoderma harzianum* e *Bradyrhizobium* spp. elevou em até 84% o comprimento radicular e aumentou mais de 80% a biomassa total, além de melhorar o Índice de Qualidade de Dickson (Ferreira; Gatto; Ramos, 2025). Esses resultados reforçam que efeitos sinérgicos podem potencializar mecanismos fisiológicos, como maior produção de reguladores de crescimento, estímulo à formação de raízes laterais e aumento da eficiência fotossintética.

No gênero *Corymbia*, resultados semelhantes têm sido observados. Em pesquisas com *C. citriodora*, a aplicação combinada de fungos e bactérias, sobretudo *Trichoderma* spp. e *B. subtilis*, promoveu incrementos relevantes na altura, massa seca e vigor das mudas, indicando forte compatibilidade entre essas espécies e microrganismos promotores (Ribeiro *et al.*, 2023). Esse comportamento está associado à capacidade dessas cepas de modular o microbioma rizosférico, aumentando a absorção de nutrientes essenciais e a tolerância a estresses ambientais.

Outros trabalhos reforçam a aplicabilidade dos PGPM em sistemas florestais tropicais. A coinoculação envolvendo fungos micorrízicos arbusculares, solubilizadores de fósforo e bactérias diazotróficas elevou significativamente o crescimento de espécies madeireiras como *Tectona grandis*, demonstrando o amplo potencial dessas interações na formação de mudas robustas, aptas ao plantio em condições adversas (Lan *et al.*, 2023). Esses resultados convergem com estudos sobre a dinâmica microbiana no solo, indicando que os microrganismos introduzidos não apenas sobrevivem, mas modulam positivamente a atividade metabólica e funcional do microbioma local (Senkovs *et al.*, 2021).

A adoção de biofertilizantes microbianos também apresenta impactos positivos na sustentabilidade do setor florestal. A substituição parcial de fertilizantes minerais por inoculantes reduz custos de produção, melhora a fertilidade biológica do solo e diminui a pressão por fontes minerais não renováveis. Trabalhos sobre miniestaquia aplicada a *Corymbia* e *Eucalyptus* também demonstram que a interação entre manejo adequado e bioinsumos pode ampliar a eficiência operacional em viveiros florestais (Lima *et al.*, 2022).

3.4 Parâmetros morfológicos, biométricos e fisiológicos na avaliação da qualidade de mudas

A avaliação da qualidade de mudas florestais é um dos pilares mais importantes para o sucesso do plantio, influenciando diretamente a sobrevivência inicial, o crescimento e a uniformidade dos povoamentos. Estudos mostram que a combinação de parâmetros morfológicos e fisiológicos fornece uma visão mais robusta da qualidade estrutural e funcional das plantas, permitindo a seleção de mudas capazes de enfrentar condições adversas no pós-plantio. Tradicionalmente, indicadores como altura, diâmetro do coleto, massa seca da parte aérea e das raízes têm sido amplamente utilizados, pois são mensurações de fácil obtenção e correlacionam-se fortemente com o vigor inicial de mudas florestais (Gallegos-Cedillo *et al.*, 2021; Mataruga *et al.*, 2023).

Além das características morfológicas básicas, os parâmetros biométricos, como volume radicular, relação parte aérea/raiz, área foliar, biomassa total e índices alométricos, auxiliam na compreensão da arquitetura de crescimento e da capacidade de absorção de nutrientes das mudas. Trabalhos conduzidos por Bernardo *et al.* (2025) com *Hymenaea martiana* e espécies nativas brasileiras demonstram que análises biométricas precisas, inclusive por métodos digitais, permitem diferenciar lotes de sementes, identificar padrões de crescimento e prever desempenho em campo de maneira mais eficiente. Esses parâmetros biométricos são especialmente relevantes em viveiros florestais, onde pequenas diferenças estruturais podem resultar em diferentes padrões de adaptação após o transplântio (Bernardo *et al.*, 2025).

As características fisiológicas, por sua vez, são fundamentais para compreender o comportamento metabólico das mudas e sua capacidade de tolerar estresses ambientais. Entre os indicadores mais utilizados estão o teor de clorofilas, a fluorescência da clorofila a, eficiência fotossintética, teor de água nos tecidos e índices que relacionam lignificação, crescimento e robustez. Pesquisas recentes revelam que parâmetros fisiológicos são excelentes preditores de eficiência nutricional, sobretudo no uso de nitrogênio e fósforo, controlando respostas fotossintéticas e a produção de biomassa. Esses indicadores, embora mais complexos, tornam-se essenciais quando o objetivo é produzir mudas altamente tolerantes e com crescimento acelerado (Kulmann *et al.*, 2022).

Entre os índices integradores, o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) destaca-se como uma das ferramentas mais completas para avaliação global da qualidade de mudas. Seu uso aumentou mais de 150% na última década, especialmente na pesquisa florestal brasileira, por considerar simultaneamente a relação entre biomassa aérea e radicular, robustez da planta, equilíbrio estrutural e potencial de sobrevivência (Gallegos-Cedillo *et al.*, 2021). Estudos com *E. grandis* × *E. urophylla* demonstram que mudas com maiores valores de IQD apresentam melhores taxas de sobrevivência, uniformidade e crescimento ao longo de todo o ciclo de

produção, mesmo em rotações completas de plantios comerciais. Dessa forma, o IQD tornou-se um indicador-chave na seleção de mudas de qualidade superior em escala comercial (Moreira *et al.*, 2023).

No caso de espécies do gênero *Corymbia*, parâmetros morfofisiológicos também têm demonstrado grande capacidade preditiva. A inoculação de mudas com rizobactérias, como *Bacillus* sp., mostrou-se eficiente em promover alterações positivas na arquitetura radicular, na eficiência de uso de nutrientes, na fluorescência da clorofila e na produção de biomassa, resultando em índices de qualidade significativamente superiores. Essas mudanças indicam maior capacidade de resistência a estresses e melhor estabelecimento em campo, reforçando que parâmetros morfológicos e fisiológicos integrados são essenciais para prever o desempenho dessas espécies (Raimam *et al.*, 2024).

Por fim, estudos de monitoramento de qualidade em viveiros florestais reforçam que a variabilidade nos parâmetros morfológicos, biométricos e fisiológicos está diretamente relacionada ao manejo do viveiro, ao substrato, à irrigação e ao controle fitossanitário. A ausência de padronização provoca deformações radiculares, deficiências nutricionais e maior suscetibilidade a perdas após o plantio. Portanto, a adoção de critérios quantitativos e integrados para avaliação da qualidade, incluindo altura, diâmetro, biomassa, eficiência fisiológica e IQD, constitui um procedimento indispensável para garantir o sucesso de programas de restauração ecológica, silvicultura comercial e conservação de espécies nativas e exóticas (Souza *et al.*, 2021).

3.5 Tecnologias sustentáveis na produção de mudas e o potencial dos biofertilizantes

A adoção de tecnologias sustentáveis tem se tornado prioridade na modernização da produção de mudas florestais, especialmente frente ao aumento da demanda por insumos de baixo impacto ambiental e à necessidade de reduzir a dependência de fertilizantes químicos. Nesse contexto, os biofertilizantes surgem como alternativas estratégicas por integrarem microrganismos com capacidade de fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo e potássio, produção de fitormônios e melhoria da estrutura do substrato, favorecendo o desenvolvimento vegetal de forma eficiente e ambientalmente segura. Esses insumos ajudam na manutenção da fertilidade do solo em sistemas de produção intensiva, atuando tanto na ciclagem de nutrientes quanto na ativação de processos bioquímicos essenciais para o crescimento das mudas (Rehman *et al.*, 2021).

Diversos estudos demonstram que biofertilizantes microbianos são capazes de aumentar o crescimento e a produtividade vegetal, além de contribuir para maior tolerância a estresses

abióticos, como déficit hídrico e salinidade (Nosheen; Ajmal; Song, 2021). A inserção desses inoculantes no setor florestal é particularmente relevante, pois muitas espécies tropicais são cultivadas em substratos empobrecidos ou apresentam exigências fisiológicas que dificultam seu estabelecimento inicial. Assim, microrganismos solubilizadores de P e K, fixadores de N e produtores de reguladores de crescimento podem potencializar a fase de viveiro, reduzindo custos de adubação e melhorando a qualidade das mudas destinadas ao campo (Ribeiro *et al.*, 2023).

Nesse cenário, o uso de vermicomposto também se destacou como alternativa viável e de baixo custo, sobretudo para pequenos produtores. O processo de vermicompostagem transforma resíduos orgânicos em um biofertilizante rico em nutrientes, com alta capacidade de tamponamento e presença de microrganismos benéficos. Estudos recentes demonstraram que vermicomposto pode substituir parcial ou totalmente o substrato comercial na produção de *C. citriodora*, mantendo bons índices de germinação e crescimento inicial, embora altas concentrações possam reduzir o Índice de Qualidade de Dickson devido ao acúmulo de sais (Ferreira *et al.*, 2025).

A integração entre biofertilizantes microbianos e tecnologias sustentáveis de substrato também tem mostrado importantes. Pesquisas conduzidas em espécies florestais de zonas secas indicam que a combinação entre fungos micorrízicos arbusculares, compostos orgânicos e biochar aumenta a taxa de germinação, acelera o crescimento de mudas e melhora a colonização micorrízica, ampliando a absorção de nutrientes e a tolerância a estresses edáficos (Yapa *et al.*, 2023).

Diante desse conjunto de evidências, fica claro que os biofertilizantes e os substratos alternativos representam ferramentas fundamentais para a sustentabilidade da silvicultura moderna. Além de reduzirem custos e impactos ambientais, essas tecnologias promovem mudas mais vigorosas, com maior capacidade de estabelecimento no campo e melhor desempenho em ambientes adversos, contribuindo para sistemas florestais mais resilientes e alinhados às demandas globais de conservação, restauração e produção sustentável (Yapa *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2025).

4 DESEMPENHO MORFOFISIOLÓGICO E QUALIDADE DE MUDAS DE *Corymbia citriodora* SUBMETIDAS À APLICAÇÃO DE BIOFERTILIZANTES MICROBIANOS

RESUMO

A produção de mudas de *Corymbia citriodora* de alta qualidade é essencial para o sucesso de plantios florestais, sendo a fase de viveiro um período crítico para o estabelecimento das plantas. Diante disso, objetivou-se avaliar o efeito de biofertilizantes microbianos (Barvar[®] N, P, K, Mix NPK e controle) no desempenho morfofisiológico e na qualidade de mudas de *C. citriodora* em viveiro. O experimento foi conduzido em viveiro, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 5×2 , composto por cinco tratamentos (BARVAR+N, BARVAR+P, BARVAR+K, MIX NPK e controle) e duas épocas de avaliação (30 e 60 dias), com cinco repetições por tratamento. Foram analisados parâmetros morfológicos (altura e diâmetro do coleto), biométricos (massas secas e volume radicular) e fisiológicos (índice de lignificação e Índice de Qualidade de Dickson - IQD). Os resultados demonstraram que o tratamento BARVAR+K (solubilizador de potássio) proporcionou os melhores desempenhos: maior altura (11,57 cm), massa seca total (0,33 g) e IQD (0,11), indicando mudas melhores e equilibradas. O BARVAR+N (fixador de nitrogênio) também se destacou, enquanto o MIX NPK apresentou resultados inferiores, sugerindo que as formulações específicas podem ser mais eficazes que combinações. O BARVAR+P e o controle (sem inoculação) obtiveram os piores resultados. Concluiu-se que biofertilizantes microbianos, especialmente BARVAR+K, melhoram significativamente a qualidade das mudas de *C. citriodora*, otimizando seu crescimento inicial, potencial de sobrevivência em campo e a viabilidade desses insumos como alternativa sustentável à fertilização convencional.

Palavras-chaves: Crescimento inicial. Índice de Dickson. Índice de lignificação. Volume radicular.

MORPHOPHYSIOLOGICAL PERFORMANCE AND QUALITY OF *Corymbia citriodora* SEEDLINGS SUBJECTED TO THE APPLICATION OF MICROBIAL BIOFERTILIZERS

ABSTRACT

The production of high-quality *Corymbia citriodora* seedlings is essential for the success of forest plantations, and the nursery phase is a critical period for plant establishment. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of microbial biofertilizers (Barvar[®] N, P, K, Mix NPK, and a non-inoculated control) on the morphophysiological performance and quality of *C. citriodora* seedlings grown under nursery conditions. The experiment was conducted in a nursery using a completely randomized design (CRD) in a 5×2 factorial arrangement, consisting of five treatments (BARVAR+N, BARVAR+P, BARVAR+K, MIX NPK, and control) and two evaluation periods (30 and 60 days), with five replicates per treatment. Morphological (height and root collar diameter), biometric (shoot, root, and total dry mass, and root volume), and physiological (lignification index and Dickson Quality Index – DQI) parameters were evaluated. The results showed that the BARVAR+K treatment (potassium-

solubilizing biofertilizer) provided the best performance, with the greatest height (11.57 cm), total dry mass (0.33 g), and DQI (0.11), indicating more vigorous and well-balanced seedlings. BARVAR+N (nitrogen-fixing biofertilizer) also showed promising results, whereas the MIX NPK treatment performed less effectively, suggesting that specific formulations may be more efficient than combined applications. BARVAR+P and the non-inoculated control produced the poorest results. It was concluded that microbial biofertilizers, particularly BARVAR+K, significantly improve the quality of *C. citriodora* seedlings, enhancing their initial growth and demonstrating their potential as a sustainable alternative to conventional fertilization.

Keywords: Initial growth. Dickson index. Lignification index. Root volume.

4.1 INTRODUÇÃO

Os gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus* constituem uma das principais bases da silvicultura tropical moderna, com aproximadamente 7,83 milhões de hectares plantados no Brasil, o que representa cerca de 76% da área total de florestas plantadas no país e cerca de 0,9% do PIB brasileiro. Em 2023, o setor de florestas plantadas movimentou mais de R\$ 202,6 bilhões e gerou cerca de 2,69 milhões de empregos diretos e indiretos, principalmente na produção de celulose (mais de 24 milhões de toneladas/ano), papel (10,8 milhões de toneladas), painéis de madeira (8,1 milhões de m³), pisos laminados (10,4 milhões de m²), biomassa energética (6,7 milhões de toneladas) e produtos farmacêuticos (IBÁ, 2024). Ainda segundo o Ibá (2024), o setor florestal brasileiro gerou um aporte de R\$ 24 bilhões em tributos federais e estaduais.

No entanto, o desenvolvimento de um setor florestal não depende apenas do aumento da produtividade, mas também do manejo adequado afim de assegurar a sobrevivência e perpetuação da espécie. Esse sistema avançado depende em grande parte do uso de recursos orgânicos e biológicos que otimizam insumos artificiais, como fertilizantes (Nejatzadeh, 2020).

Os fertilizantes convencionais de nutrição mineral vêm enfrentando desafios, como: (i) custos crescentes (FAO, 2023), (ii) perdas por lixiviação que atingem até 40-60% do N e K aplicado (Wei *et al.*, 2021), e (iii) impactos na microbiota edáfica (Zhang *et al.*, 2022). Como alternativa, os biofertilizantes à base de microrganismos promotores de crescimento vegetal vêm ganhando destaque, combinando eficiência com sustentabilidade ambiental (Seenivasagan; Babalola, 2021; Basu *et al.*, 2021; Maitra *et al.*, 2022).

Neste contexto, os biofertilizantes emergem como alternativas promissoras, oferecendo benefícios como a redução de impactos ambientais e o estímulo ao crescimento vegetal por meio de processos naturais, além da melhoria nos elementos minerais do solo. Os bioestimulantes são compostos orgânicos, naturais ou sintéticos, que modificam os processos morfológicos ou fisiológicos de um vegetal (Campos, Santos e Oliveira, 2020). A aplicação de

bioreguladores podem ser empregados em tratamento de sementes e plantas via foliar, com a finalidade de melhorar o crescimento das plantas. Nesse sentido, os bioreguladores funcionam como ativadores do metabolismo fisiológico nas diferentes fases da germinação (Maia *et al.*, 2024), contribuindo para formação de novos tecidos e consequentemente para a formação das raízes, folhas, flores, frutos e sementes. Além da eficiência nutricional, muitos desses produtos também apresentam efeitos biorracionais e de controle biológico, auxiliando no manejo de fitopatógenos por mecanismos como competição, antibiose ou indução de resistência sistêmica (Maitra *et al.*, 2022).

O biofertilizante Barvar[®] (GreenBiotech) utiliza tecnologia avançada em microbiologia aplicada, contendo estirpes bacterianas especializadas com comprovada ação na ciclagem de nutrientes: *Azotobacter vinelandii* (fixação biológica de N atmosférico), *Pseudomonas putida* (solubilização de P), e *P. vancouverensis* (mobilização de K) – cada uma adaptada a condições edafoclimáticas adversas (Green Biotech Incorporation, 2025).

O Barvar[®] também aumenta o rendimento das culturas, melhorando a absorção dos componentes fertilizantes, contudo, persistem questões científicas não resolvidas sobre: (a) a eficácia comparativa entre inoculantes específicos versus formulações combinadas, (b) seus efeitos em parâmetros morfofisiológicos-chave de qualidade de mudas, e (c) a dinâmica temporal de resposta em espécies do gênero *Corymbia*.

Na busca de contribuir para a otimização de protocolos de produção de mudas florestais, que utilizem os biofertilizantes para práticas silviculturais mais sustentáveis, no presente estudo objetivou-se avaliar os efeitos de diferentes formulações de biofertilizantes (Barvar[®] N, P, K e sua combinação Mix NPK) no crescimento, desenvolvimento e qualidade de mudas de *Corymbia citriodora*.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação pertencente ao Centro de Monitoramento Ambiental e Manejo do Fogo - CeMAF, vinculado à Universidade Federal do Tocantins (UFT), no campus de Gurupi - TO, localizado sob as coordenadas 11°43'45" S e 49°04'07" O.

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger a região possui um clima do tipo *Aw*, (tropical com estação seca no inverno), caracterizada por invernos secos e verões chuvosos. As

condições climáticas locais incluem temperatura média anual de aproximadamente 27 °C e precipitação média anual de aproximadamente 1.800 mm (SEPLAN, 2021). As avaliações foram conduzidas entre os meses de setembro e outubro de 2025. Nesse período, a temperatura média foi de 28,0 °C e a precipitação acumulada atingiu 34,2 mm, sendo registradas médias mensais de 27,5 °C e ausência de precipitação em setembro, e de 28,4 °C e 34,2 mm de precipitação em outubro, conforme dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2026).

As sementes de *C. citriodora* utilizadas no experimento são oriundas de coletas realizadas em 2022 em áreas experimentais de testes de pomares localizadas no estado de São Paulo, do programa de melhoramento do IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. O lote utilizado foi composto por 168 progênies, cujas sementes foram armazenadas em câmara fria a 20 °C até o momento do uso. Após o beneficiamento, as sementes foram semeadas em tubetes com volume de 55 cm³, preenchidos com substrato comercial, garantindo condições adequadas para a germinação e o desenvolvimento inicial das plântulas. As bandejas foram dispostas em viveiro com 50% de sombreamento e mantidas sob irrigação automática, com quatro ciclos diários de irrigação, para garantir umidade adequada ao desenvolvimento das mudas. A duração total do experimento foi de 60 dias, com avaliações realizadas aos 30 e 60 dias após a aplicação dos tratamentos.

Foi utilizado o substrato comercial Bioflora® Plant Ciclos Germinar. Sua composição é formada por uma mistura de materiais orgânicos e minerais, incluindo casca de *Pinus* compostada, vermiculita expandida, areia de quartzo, calcário dolomítico, gesso agrícola, fosfato natural, termofosfato, torta de mamona, farinha de osso, supersimples e micronutrientes. Apresenta pH de 5,0, condutividade elétrica (CE) de 2,0 mS/cm (diluição 1:5), densidade de 300 kg/m³ (base seca) e capacidade de retenção de água (CRA) de 130% (m/m).

4.2.2 Delineamento experimental

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 5 × 2, sendo cinco tipos de biofertilizantes e dois períodos de avaliação (30 e 60 dias após aplicação), com cinco repetições de cinco plantas cada. Cada tratamento foi constituído por 25 plantas em cada período de avaliação, totalizando 250 plantas no experimento. Os biofertilizantes consistiram em: BARVAR+N (Barvar® AzotoBarvar-1), BARVAR+P (Barvar® PhosphoBarvar-2), BARVAR+K (Barvar® PotaBarvar-2), MIX NPK (combinação das três formulações) e Control (controle, sem aplicação) (Tabela 1).

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos avaliados, incluindo sua composição nutricional e os principais biofertilizantes presentes nos biofertilizantes Barvar®

Tratamento	Composição	Microrganismos principais
BAVAR+N	Fixação de N	<i>Azotobacter vinelandii</i>
BAVAR+P	Solubilização de P	<i>Pseudomonas putida</i> , <i>Pantoea agglomerans</i>
BAVAR+K	Solubilização de K	<i>Pseudomonas vancouverensis</i> , <i>P. koreensis</i>
MIX NPK	Combinação N, P e K	Todos os anteriores
CONTROL	Controle (sem inoculação)	—

Fonte: Barvar® (2025).

Os produtos Barvar® utilizados neste experimento são biofertilizantes desenvolvidos pela empresa GreenBiotech, sediada em Teerã, no Irã, compostos por bagaço de cana-de-açúcar (30%), perlita (30%), água (30%) e (10%) de microrganismos específicos que atuam na fixação ou solubilização de nutrientes. O Barvar® N contém a cepa 04 de *Azotobacter vinelandii* (10^7 a 10^8 UFC g⁻¹), uma bactéria aeróbica de vida livre, capaz de fixar nitrogênio atmosférico mesmo sob condições adversas de salinidade (até 7%), pH (4 a 11) e temperatura (até 45 °C).

O Barvar® P é formulado com cepas de bactérias *Pseudomonas putida* e *Pantoea agglomerans* (10^7 a 10^8 UFC g⁻¹), duas solubilizadoras de fosfato, que secretam ácidos orgânicos e enzimas fosfatases, atuando na liberação de íons fosfato a partir de compostos orgânicos e inorgânicos insolúveis no solo. Já o Barvar® K contém cepas de duas bactérias solubilizadoras de potássio, *Pseudomonas vancouverensis* e *Pseudomonas koreensis* (10^7 a 10^8 UFC g⁻¹) que atuam na liberação de íons potássio por meio da hidrólise de compostos insolúveis de K ao redor da rizosfera.

4.2.3 Preparo e aplicação das soluções

Para o preparo das soluções, cada produto (BAVAR+N, BAVAR+P e BAVAR+K) foi diluído em 100 mL de solução salina a 0,85% de NaCl, utilizando-se 10 g do respectivo produto. O tratamento MIX NPK foi preparado pela combinação de 10 mL de cada uma das soluções (N, P e K) em tubo de ensaio estéril, seguido de agitação vigorosa (2 min, 300 rpm) durante 2 minutos para homogeneização. A aplicação foi realizada com o auxílio de pipeta automática, utilizando-se 1 mL da solução por tubete, diretamente sobre o substrato. A inoculação nas 50 unidades experimentais foi realizada no dia da instalação do experimento, com aplicação de 1

mL da solução correspondente por tubete, utilizando pipeta automática calibrada, diretamente no substrato próximo às raízes das mudas.

4.2.4 Variáveis analisadas

Aos 30 e 60 dias após os transplantes, foram avaliadas variáveis morfológicas, biométricas e fisiológicas. Para os parâmetros morfológicos, foram mensuradas a altura da planta (H, cm), e o diâmetro do coleto (DC mm), com o auxílio de paquímetro digital. Nos parâmetros biométricos, determinaram-se a massa seca da parte aérea (MSPA g), massa seca das raízes (MSR g), volume de raiz (VR, mL), massa seca total (MST g), relação MSPA/MSR e a relação altura/diâmetro do coleto (HT/DC). Entre os índices fisiológicos, avaliou-se o índice de lignificação, obtido pela razão entre massa seca total com a massa úmida total, conforme metodologia adaptada de Silva *et al.* (2025), e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), parâmetro amplamente utilizado para a avaliação da qualidade de mudas, pois relaciona características da parte aérea e do sistema radicular. O índice de qualidade de Dickson foi determinado por meio da fórmula (Dickson; Leaf; Hosner, 1960):

$$DQI = \frac{TDM (g)}{\frac{H (cm)}{SD (mm)} + \frac{SDM (g)}{RDM (g)}} \quad (1)$$

Em que: IQD = Índice de Qualidade de Dickson; TDM (*Total Dry Mass*) = massa seca total da muda (g); H (*Height*) = altura da muda (cm); SD (*Stem Diameter*) = diâmetro do coleto (mm); SDM (*Shoot Dry Mass*) = massa seca da parte aérea (g); RDM (*Root Dry Mass*) = massa seca das raízes (g).

Além das análises descritivas, foi realizada a correlação de Pearson entre as variáveis morfológicas, biométricas e fisiológicas, com o objetivo de identificar possíveis relações lineares significativas entre os parâmetros avaliados.

O volume de raiz foi determinado por deslocamento de água, utilizando proveta graduada de 100 mL, sendo o volume final expressado em mililitros (mL). Para a obtenção da biomassa seca, cinco plantas por tratamento foram selecionadas aleatoriamente. Em seguida as plantas foram separadas em parte aérea e sistema radicular por meio de corte à altura do diâmetro do coleto, e secas em estufa de circulação forçada a 70 °C por 72 horas até atingirem massa constante. Imediatamente após a retirada da estufa, as amostras foram pesadas em balança analítica (precisão = 0,001 g) para obtenção de MSPA, MSR e MST.

4.2.5 Análises estatísticas

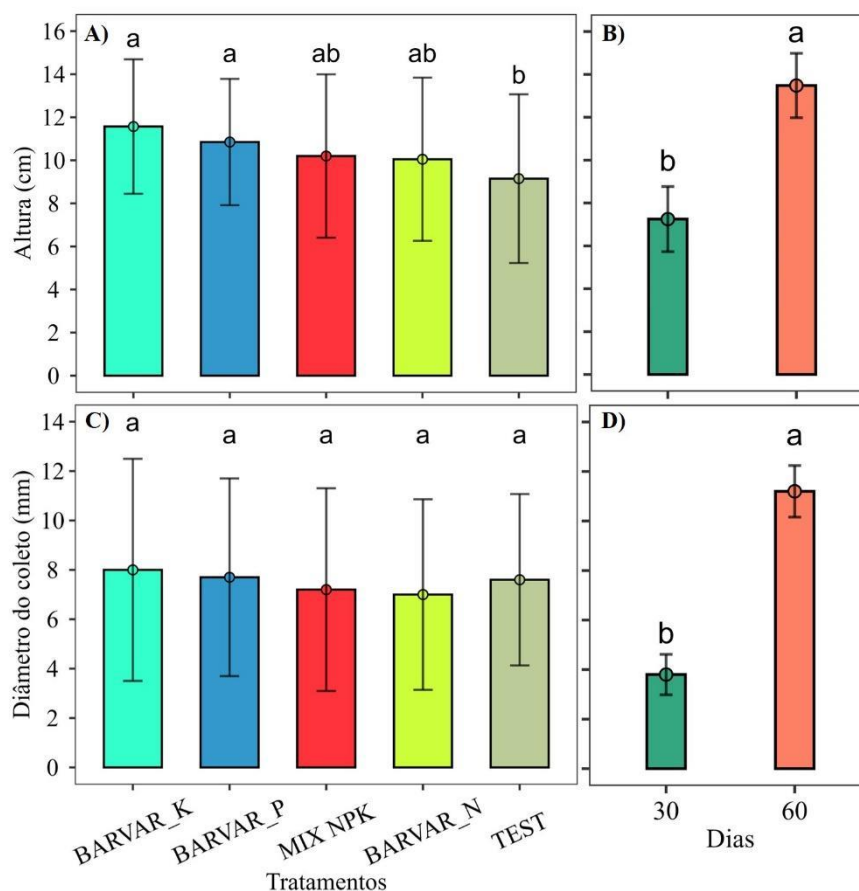
Para verificar os pressupostos da análise de variância (ANOVA), os dados foram analisados quanto à: a) normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) complementada por visualização em QQ plot (Crawley, 2012), b) homocedasticidade pelo teste de Bartlett ($p > 0,05$), e c) independência entre unidades experimentais. Uma vez atendidos esses pressupostos, os dados foram submetidos à ANOVA fatorial. Em caso de diferenças significativas entre os dados, as médias foram comparadas usando o teste post-hoc de Tukey ($p < 0,05$). O coeficiente de correlação de Pearson foi determinado com base nas médias das variáveis. Os gráficos foram gerados utilizando o pacote "ggplot2" (Wickham, 2016), e as análises foram realizadas utilizando o pacote AgroR (Shimizu; Marubayashi; Gonçalves, 2024). Todas as análises estatísticas foram realizadas no programa R versão 4.0.5 (R Development Core Team, 2025), ao nível de $p \leq 0,05$ de significância.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Parâmetros morfológicos

Não houve interação entre os fatores biofertilizante e tempo para as variáveis altura ($p=0,3635$) e diâmetro do coleto ($p=0,1667$). No entanto, os resultados demonstraram que os tratamentos com os biofertilizantes BAVAR+K e BAVAR+P propiciaram aumento significativo na altura ($11,6 \pm 3,1$ cm e $10,9 \pm 3,8$ cm, respectivamente) das mudas de *C. citriodora* em comparação ao controle ($9,2 \pm 3,9$ cm) (Figura 1A). Para o diâmetro do coleto não houve diferença significativa entre os tratamentos ($p=0,0981$) (Figura 1B). Considerando o tempo pós-aplicação, aos 60 dias a altura (13,5 cm) e o diâmetro (11,2 mm) apresentaram diferenças significativas em relação aos 30 dias. Em 30 dias a altura teve um incremento de 87% e o DC de 195%.

Figura 1 - Altura da planta (cm) e diâmetro do coleto (mm) de mudas de *C. citriodora* submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplântio



Fonte: Elaboração autoral (2025).

Onde: (A) Altura da planta em função dos biofertilizantes; (B) Altura da planta em função do tempo; (C) Diâmetro do coleto em função dos biofertilizantes; (D) Diâmetro do coleto em função do tempo. Barras representam a média $\pm$ desvio-padrão. Letras distintas indicam diferença significativa entre biofertilizantes ou tempos de avaliação, conforme teste de Tukey ($p < 0,05$).

Esses resultados demonstram que, embora os biofertilizantes não tenham influenciado significativamente o diâmetro do coleto, o desenvolvimento natural das mudas apresentou um crescimento estrutural acentuado ao longo do tempo, independentemente dos tratamentos aplicados. Segundo Ribeiro *et al.* (2025), o diâmetro do coleto é menos sensível à aplicação no curto prazo, mas altamente responsivo ao fator tempo.

O aumento significativo da altura das mudas de *C. citriodora*, corrobora com o estudo de Ribeiro *et al.* (2025), no qual observaram melhor desempenho nos estágios iniciais de *Eucalyptus urograndis* com uso de solubilizadores de potássio e fósforo. Sousa *et al.* (2022) relataram que bactérias diazotróficas em *E. urophylla* promoveram crescimento via produção

de compostos indólicos e fixação de nitrogênio, destacando a importância dos microrganismos na nutrição e regulação hormonal das plantas.

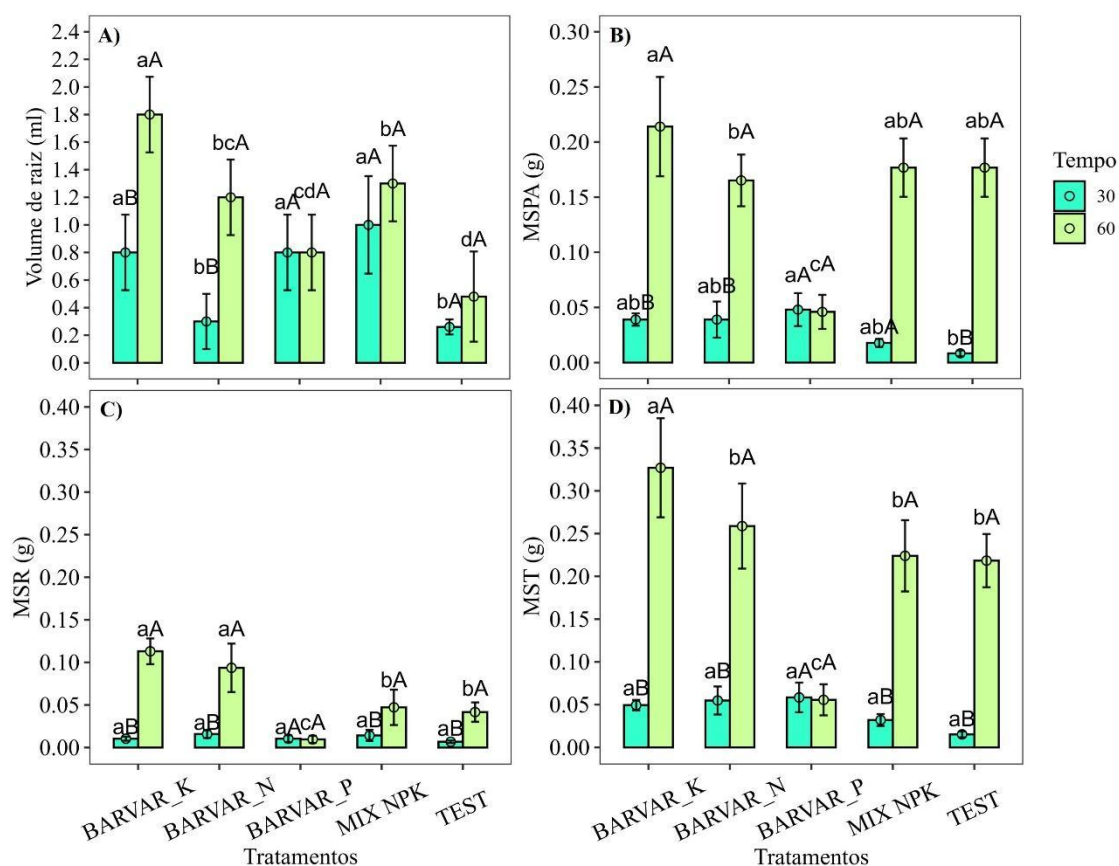
A ausência de diferenças no diâmetro do coleto entre tratamentos, apesar do crescimento temporal, também foi relatado no estudo de Ribeiro *et al.* (2025), estudando a espécie *E. urograndis*. De acordo com Raimam *et al.* (2024), a inoculação com *Bacillus* sp. melhorou a arquitetura radicular, trocas gasosas e eficiência no uso de nutrientes em *Corymbia*, com maior impacto em altura e sistema radicular, sugerindo que o diâmetro do coleto é uma variável menos sensível à ação microbiana nos estágios iniciais.

Complementando, Ribeiro *et al.* (2025) relataram que, embora o diâmetro do coleto possa ser menos sensível aos tratamentos no curto prazo, a inoculação com microrganismos promotores de crescimento favorece a altura das plantas e parâmetros radiculares em *Eucalyptus urograndis*, indicando um padrão consistente de resposta positiva das espécies florestais a esses biofertilizantes.

4.3.2 Parâmetros biométricos

Foi observado interação significativa entre os tratamentos e o tempo após aplicação para volume de raiz (VR), massa seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR) e total (MST). Para o VR, embora todos os tratamentos tenham mostrado um aumento do volume de 30 para 60 dias, BAVAR+K foi o mais eficaz, atingindo volume de $1,80 \pm 0,27$ mL aos 60 dias. O tratamento CONTROL apresentou o menor VR em ambos os tempos, com aproximadamente $0,26 \pm 0,05$ mL aos 30 dias e $0,48 \pm 0,33$ mL aos 60 dias (Figura 2A). O tratamento com BAVAR+K apresentou a maior MST aos 60 dias ($0,33 \pm 0,06$ g), indicando sua eficácia global no desenvolvimento da planta, enquanto os demais tratamentos apresentaram valores inferiores, variando de $0,06 \pm 0,02$ g (BAVAR+P) a $0,26 \pm 0,05$ g (BAVAR+N) (Figura 2D).

Figura 2 - Volume de raiz (mL) e massas secas da parte aérea (g), da raiz (g) e total (g) de mudas de *C. citriodora* submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplântio



Fonte: Elaboração autoral (2025).

Onde: (A) Volume de raiz; (B) massa seca da parte aérea; (C) massa seca de raiz; (D) massa seca total. Letras minúsculas indicam diferença significativa entre tratamentos dentro do mesmo tempo, e letras maiúsculas indicam diferença significativa entre tempos para o mesmo tratamento (Teste de Tukey, $p < 0.05$).

Os resultados demonstram que o tratamento com biofertilizante BAVAR+K promoveu um desenvolvimento vegetal superior em comparação aos demais tratamentos, refletindo em maiores taxas no VR e MST proporcionou um melhor desenvolvimento das plantas em comparação os demais tratamentos. Isso sugere que a combinação de biofertilizantes com suplementação de potássio potencializa a eficiência nutricional, favorecendo o crescimento, a produtividade e o desenvolvimento vegetal (Figura 2).

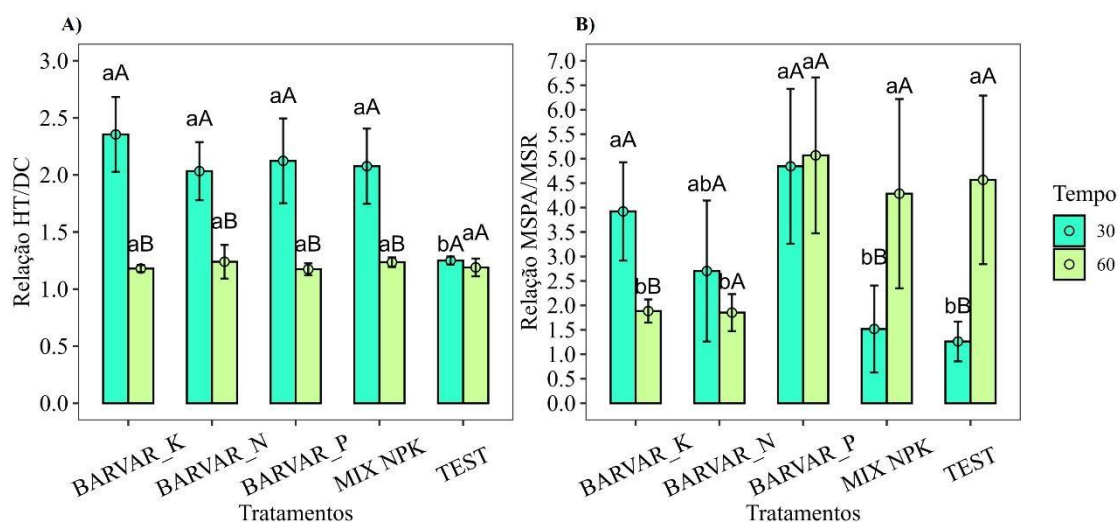
O aumento significativo na biomassa das mudas de *C. citriodora* inoculadas com biofertilizantes estão em consonância com estudos prévios de Sousa *et al.* (2022), que observaram que bactérias diazotróficas como *Nitrospirillum amazonense* e *Stenotrophomonas maltophilia* de *Eucalyptus urophylla* promovem o crescimento por meio da fixação de

nitrogênio e da produção de compostos indólicos. Resultados semelhantes foram reportados por Raimam *et al.* (2024) que constataram que a rizobactéria *Bacillus sp.* CCMD862 aumentou não apenas a biomassa, mas também a altura, o diâmetro do coleto e a arquitetura radicular em mudas de *Corymbia*. Esses achados reforçam que a inoculação com microrganismos eficientes pode melhorar significativamente o vigor e o desenvolvimento de plantas, corroborando os resultados obtidos neste estudo.

O desempenho inferior do tratamento MIX NPK em relação aos biofertilizantes específicos pode estar relacionado à interação entre os diferentes microrganismos presentes na formulação combinada. Embora esses microrganismos desempenhem funções complementares, como fixação biológica de nitrogênio e solubilização de fósforo e potássio, a aplicação conjunta pode favorecer processos de competição por nichos ecológicos, nutrientes e fontes de carbono na rizosfera, reduzindo a eficiência de colonização radicular e a expressão dos mecanismos promotores de crescimento. Em contrapartida, formulações específicas direcionam a atividade microbiana para um único mecanismo funcional, o que pode resultar em maior eficiência na disponibilização de nutrientes e no desenvolvimento das mudas (Basu *et al.*, 2021; Aloo *et al.*, 2022).

A Relação MSPA/MSR demonstrou variações significativas entre os tratamentos e ao longo do tempo, indicando diferentes estratégias de alocação de biomassa (Figura 3B). Esta relação quantifica a partição de biomassa: quando >1 , predomina crescimento aéreo (fotossintético); quando <1 , há prioridade radicular (adaptação a estresses); e ≈ 1 indica equilíbrio morfofisiológico (Ahmed *et al.*, 2024). Aos 60 dias, BAVAR+P, CONTROL e MIX NPK registraram as maiores relações ($5,1 \pm 1,6$; $4,6 \pm 1,7$ e $4,3 \pm 1,9$, respectivamente), indicando uma alocação proporcionalmente maior de biomassa para a parte aérea (Figura 3B).

Figura 3 - Relação altura/diâmetro do coleto (HT/DC) e relação massa seca da parte aérea/massa seca da raiz (MSPA/MSR) de mudas de *C. citriodora* submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplântio



Fonte: Elaboração autoral (2025).

Onde: (A) Relação HT/DC; (B) relação MSPA/MSR. Letras minúsculas indicam diferença significativa entre tratamentos dentro do mesmo tempo, e letras maiúsculas indicam diferença significativa entre tempos para o mesmo tratamento (Teste de Tukey, $p < 0.05$).

No entanto, vale destacar que, apesar dessas altas relações, o tratamento BAVAR+P apresentou a menor massa seca total ($0,06 \pm 0,01$ g), sugerindo que a alocação desproporcional à parte aérea não resultou em maior acúmulo de biomassa. Por outro lado, os tratamentos BAVAR+K e BAVAR+N, que apresentaram relações mais equilibradas ($1,9 \pm 0,2$ e $1,8 \pm 0,4$, respectivamente), alcançaram as maiores MST aos 60 dias ($0,33 \pm 0,05$ g e $0,26 \pm 0,04$ g), indicando que uma alocação mais balanceada entre parte aérea e raiz favoreceu o crescimento total da planta (Qi *et al.*, 2019).

Foi observada diferença estatística para a relação HT/DC aos 30 e 60 dias entre os tratamentos (Figura 3A), sendo que os tratamentos com biofertilizantes apresentaram valores mais elevados em comparação ao controle. Todos os tratamentos apresentaram redução desta relação entre os períodos avaliados. O CONTROL apresentou relação de $1,25 \pm 0,04$ aos 30 dias e $1,19 \pm 0,08$ aos 60 dias, enquanto os tratamentos com biofertilizantes mostraram valores iniciais mais elevados: BAVAR+K ($2,36 \pm 0,33$), BAVAR+P ($2,12 \pm 0,37$), BAVAR+N ($2,03 \pm 0,25$) e MIX NPK ($2,08 \pm 0,33$), diminuindo para valores entre $1,17 \pm$ (BAVAR+P) e $1,24 \pm$ (BAVAR+N e MIX NPK) no final do experimento (Figura 3A). Esta redução uniforme, sem diferenças significativas entre tratamentos em cada período, demonstra que o diâmetro do coleto aumentou proporcionalmente mais que a altura, seguindo um padrão ontogenético típico

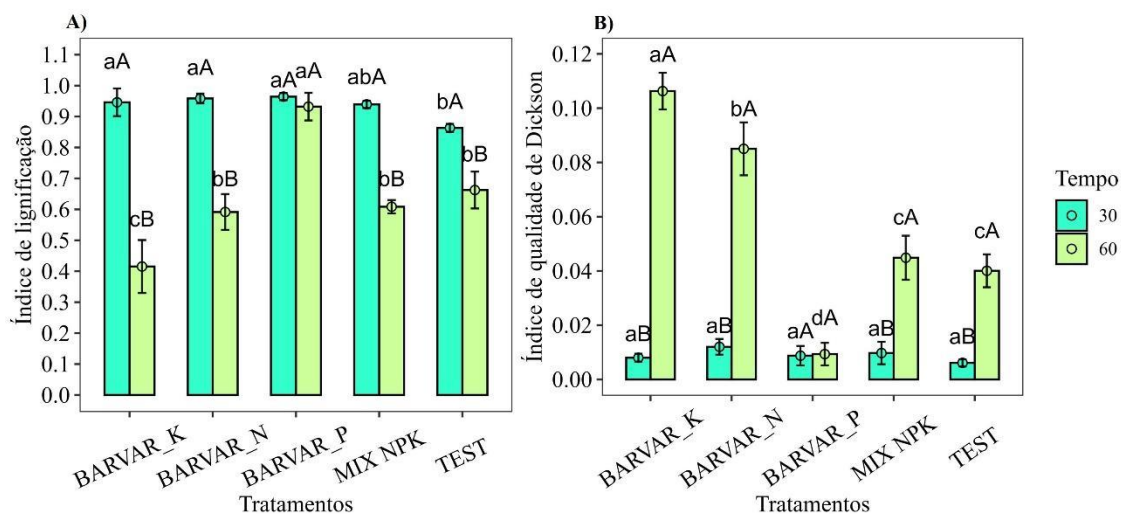
de espécies florestais (Grossnickle & MacDonald, 2018). Ademais, as mudas de *C. citriodora* demonstraram excelente robustez estrutural, fator essencial para o sucesso do transplântio.

O desempenho superior do tratamento BAVAR+K em parâmetros como VR e MST mostra um aporte nutricional mais equilibrado. A relação MSPA/MSR reforça esse padrão: enquanto os tratamentos BAVAR+K ($1,9 \pm 0,2$) e BAVAR+N ($1,8 \pm 0,4$) apresentaram valores próximos de 1, indicando uma alocação equilibrada de biomassa entre parte aérea e raiz, os demais tratamentos mostraram forte desproporcionalidade. BAVAR+P ($5,1 \pm 1,6$), CONTROL ($4,6 \pm 1,7$) e MIX NPK ($4,3 \pm 1,9$) apresentaram relação muito acima de 1, mostrando uma alocação predominante para a parte aérea, sem correspondente acúmulo em MST. Essa distribuição mais balanceada observada com BAVAR+K e BAVAR+N pode ter contribuído para um desenvolvimento funcional mais robusto, favorecendo tanto a estrutura aérea quanto a capacidade de absorção radicular. A diminuição dos valores da relação HT/DC e menor variação em todos os tratamentos, embora partindo de condições iniciais distintas, sugere a existência de um padrão morfogenético intrínseco à espécie estudada (Barbosa *et al.*, 2021).

4.3.3 Parâmetros fisiológicos

O índice de lignificação (IL), que representa a proporção de massa seca total em relação à massa úmida total da planta, é um indicador da lignina presente nos tecidos vegetais (Dionisio *et al.*, 2021). Valores mais elevados desse índice ($> 0,5$) sugerem maior lignificação, o que está associado a mudas mais resistentes e com melhor qualidade fisiológica para o plantio em campo. Neste estudo, o IL apresentou valores elevados aos 30 dias (entre 0,86 e 0,96), com redução significativa aos 60 dias. O tratamento com BAVAR+K teve a maior diminuição no índice (de 0,95 para 0,42), seguido por BAVAR+N (de 0,96 para 0,59) e MIX NPK (de 0,94 para 0,61). Por outro lado, o tratamento com BAVAR+P manteve valores altos e estáveis (de 0,96 para 0,93), enquanto o CONTROL apresentou apenas uma leve redução (de 0,86 para 0,66) (Figura 4A).

Figura 4 - Índice de lignificação e índice de qualidade de Dickson (IQD) de mudas de *C. citriodora* submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplante



Fonte: Elaboração autoral (2025).

Onde: (A) Índice de lignificação; (B) índice de qualidade de Dickson. Letras minúsculas indicam diferença significativa entre tratamentos dentro do mesmo tempo, e letras maiúsculas indicam diferença significativa entre tempos para o mesmo tratamento (Teste de Tukey, $p < 0.05$).

O índice de qualidade de Dickson (IQD) foi baixo aos 30 dias (0,01) em todos os tratamentos (Figura 4B). Aos 60 dias, BAVAR+K apresentou o maior IQD (0,11), seguido por BAVAR+N (0,09), indicando melhor equilíbrio entre parte aérea e raízes. Em contraste, BAVAR+P manteve-se estável (0,01), indicando menor eficiência no desenvolvimento, enquanto os tratamentos CONTROL e MIX NPK apresentaram valores intermediários (0,04). Entretanto, mesmo o valor mais alto encontrado (0,11) está abaixo do valor considerado ideal na literatura, que recomenda $\text{IQD} \geq 0,5$ para mudas de boa qualidade (Dickson *et al.*, 1960). Esses resultados indicam que o experimento deveria ser conduzido por um período maior (por exemplo, 90, 120 ou 150 dias) para que as mudas possam alcançar um desenvolvimento mais equilibrado e atingir valores de IQD compatíveis com padrões recomendados para transplante.

Um maior crescimento em altura não implica, necessariamente, maior qualidade das mudas. O Índice de Qualidade de Dickson permitiu verificar que tratamentos que promoveram incremento em altura, mas apresentaram menor desenvolvimento radicular ou menor acúmulo de biomassa, resultaram em IQD inferiores. Em contraste, o tratamento BARVAR+K reuniu alto crescimento em altura, maior massa seca total e melhor equilíbrio entre parte aérea e raízes, refletindo no maior IQD observado. Esses resultados reforçam que a avaliação integrada proporcionada pelo IQD é mais representativa do potencial de sobrevivência e estabelecimento

das mudas em campo do que parâmetros morfológicos analisados isoladamente (Dickson *et al.*, 1960; Dushimimana *et al.*, 2022).

Esses resultados sugerem que BAVAR+K, BAVAR+N e MIX NPK podem estar associados a um processo de desenvolvimento mais acelerado, onde a lignificação inicial é seguida por uma diferenciação celular mais intensa (Hussey, 2022). Já BAVAR+P e CONTROL apresentaram um padrão mais conservador de lignificação ao longo do tempo, possivelmente refletindo diferentes estratégias de alocação de recursos ou resposta a estresses ambientais. A variação observada destaca a importância da seleção de biofertilizantes específicos para diferentes objetivos de manejo, dependendo do estágio de desenvolvimento e das condições de cultivo (Pirttilä *et al.*, 2021).

O índice de lignificação reflete o grau de deposição de lignina nos tecidos vegetais, processo que confere rigidez estrutural, proteção contra estresses abióticos (como seca e vento) e resistência a patógenos (Ma, 2024). Nossos resultados mostraram variações significativas entre tratamentos: valores altos ($IL \geq 0,8$), como observado em BAVAR+P (0,93 aos 60 dias), indicam intensa lignificação, característica de estágios iniciais (30 dias) ou resposta a estresse, porém podem limitar o crescimento celular e a alocação de biomassa (Hussey, 2022).

Os valores moderados (0,4-0,7), apresentados por BAVAR+K (0,42) e BAVAR+N (0,59), demonstram um equilíbrio ideal entre resistência estrutural e crescimento ativo (Ma, 2024). Já valores baixos ($IL < 0,4$), embora associados a crescimento acelerado, podem comprometer a robustez das mudas para transplântio. Esses padrões mostram que a dinâmica de lignificação é um importante indicador fisiológico do desenvolvimento das mudas, sendo de muita importância para avaliar sua qualidade e adaptação a condições de campo (Hussey, 2022).

O índice de qualidade de Dickson avalia o equilíbrio entre o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular, servindo como indicador da robustez e capacidade de adaptação das mudas após o transplântio (Dushimimana *et al.*, 2022). Segundo Reyes *et al.* (2014), valores de IQD maiores ou iguais a 0,5 caracterizam mudas de alta qualidade, com excelente resistência e potencial de estabelecimento em campo. Valores entre 0,2 e 0,49 indicam qualidade moderada, exigindo maior atenção durante o transplântio, enquanto IQD inferiores a 0,2 sugerem mudas frágeis, com risco elevado de baixa sobrevivência em condições reais. Em nosso estudo, os tratamentos BAVAR+K (0,11) e BAVAR+N (0,09) apresentaram IQD próximo ao limiar de qualidade moderada, indicando um desenvolvimento equilibrado, levando em consideração que as mudas de *C. citriodora* levam cerca de 3 a 4 meses para ficarem prontas para o transplântio em campo (Oliveira *et al.*, 2024).

Além dos efeitos observados nos parâmetros fisiológicos e na qualidade estrutural das mudas, é importante destacar que os biofertilizantes utilizados contribuem para a melhoria da fitossanidade das mudas (Ma, 2024). Diversos estudos relatam que microrganismos promotores de crescimento presentes nesses produtos favorecem o controle biológico natural por meio da indução de resistência sistêmica, produção de compostos antimicrobianos e competição com patógenos na rizosfera (Messa, 2021; Wang *et al.*, 2021; Elnahal *et al.*, 2022). Esses efeitos, embora não tenham sido mensurados diretamente neste estudo, podem ter influenciado positivamente o ecossistema da rizosfera e os valores mais favoráveis de IQD observados, pois proporcionam condições mais favoráveis de crescimento e maior tolerância a estresses bióticos (Elnahal *et al.*, 2022).

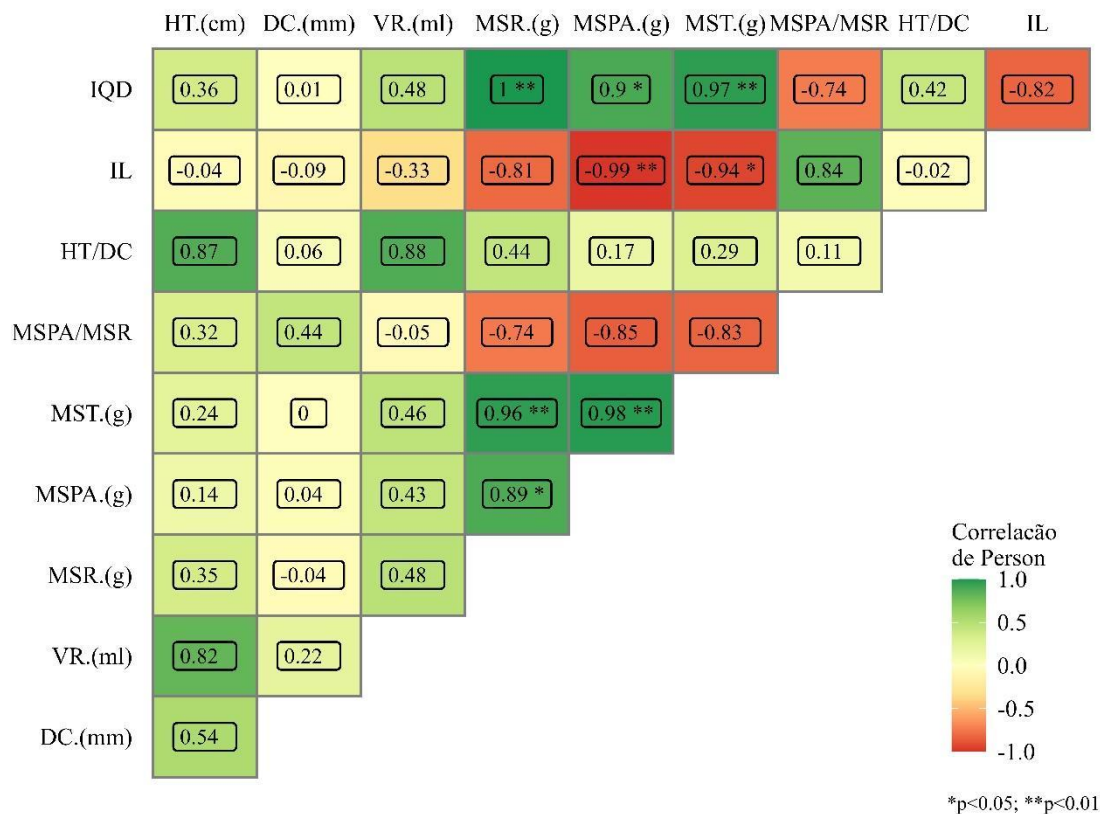
Apesar de os resultados obtidos demonstrarem que os biofertilizantes, especialmente BARVAR+K e BARVAR+N, promovem melhorias no crescimento inicial e na qualidade das mudas, os dados deste estudo ainda não permitem afirmar que esses produtos possam substituir totalmente a adubação mineral convencional em viveiros comerciais. Entretanto, os resultados indicam potencial para sua utilização como estratégia complementar ou de substituição parcial da fertilização mineral, contribuindo para maior eficiência no aproveitamento de nutrientes e para sistemas de produção mais sustentáveis. Além da redução potencial do uso de fertilizantes químicos, esses microrganismos favorecem processos biológicos da rizosfera capazes de aumentar a disponibilidade de nutrientes e estimular o crescimento vegetal. Contudo, sua eficiência pode variar em função da espécie florestal, das características do substrato, das condições ambientais e do manejo adotado, sendo necessários estudos de maior duração e avaliações em condições de campo para validar sua aplicação em escala comercial (Basu *et al.*, 2021; Aloo *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2025).

4.3.4 Correlação de Pearson

Além da análise individual das variáveis morfológicas, biométricas e fisiológicas, a análise de correlação de Pearson permitiu identificar as relações entre os diferentes parâmetros avaliados, fornecendo uma interpretação integrada da qualidade das mudas. Esses efeitos, embora não tenham sido mensurados diretamente neste estudo, podem ter influenciado positivamente o ecossistema da rizosfera e os valores mais favoráveis de IQD observados, pois proporcionam condições mais favoráveis de crescimento e maior tolerância a estresses bióticos (Elnahal *et al.*, 2022). A MST apresentou correlações positivas e fortes com MSPA (0.98**) e MSR (0.96**), indicando que o acúmulo de biomassa total está diretamente relacionado ao

desenvolvimento tanto aéreo quanto radicular. O volume de raiz (VR) correlacionou-se fortemente com a altura (HT) (0.88) e moderadamente com o diâmetro do coleto (DC) (0.22), indicando que plantas mais altas tendem a desenvolver sistemas radiculares mais volumosos (Pérez-Álvarez *et al.*, 2024) (Figura 5).

Figura 5 - Matriz de correlação de Pearson entre variáveis morfológicas, biométricas e fisiológicas indicadoras do crescimento e da qualidade de mudas de *C. citriodora*



Fonte: Elaboração autoral (2025).

Onde: Os valores indicam o coeficiente de correlação, e as cores representam a força e a direção da relação (verde: positiva, vermelho: negativa). Asteriscos indicam significância estatística (*p<0.05; **p<0.01).

O índice de qualidade de Dickson (IQD) mostrou correlações positivas significativas com MSPA (0.90*), MST (0.97**) e HT (0.36), reforçando sua importância como indicador global de qualidade de mudas (Chávez *et al.*, 2022). Em contraste, o índice de lignificação (IL) apresentou correlações negativas altamente significativas com MSR (-0.81), MSPA (-0.99**) e MST (-0.94*), além de uma forte correlação negativa com o IQD (-0.82), sugerindo que maiores teores de lignina podem estar associados a menor acúmulo de biomassa e qualidade reduzida (Healey *et al.*, 2016).

Estudos de Healey *et al.* (2016) com espécies *Corymbia* demonstraram que teores mais elevados de lignina e proporções diferenciadas entre unidades de siringil e guaiacil (S/G) influenciam negativamente a liberação de glicose após sacarificação enzimática, sugerindo menor eficiência na conversão da biomassa. Esses resultados indicam que genótipos com maior lignificação apresentam menor acúmulo de biomassa metabolizável, o que pode ser extrapolado para o desenvolvimento de mudas, em que teores mais altos de lignina tenderiam a restringir o crescimento e a qualidade das plântulas.

A relação MSPA/MSR correlacionou-se negativamente com MSR (-0.74), MSPA (-0.85) e MST (-0.83), indicando que mudas com maior biomassa total tendem a equilibrar a alocação entre parte aérea e raiz. Já a relação HT/DC mostrou forte correlação com HT (0.87) e VR (0.88), mas pouca relação com DC (0.06), IQD (0.42) ou IL (-0.02), apontando que essa variável representa principalmente o alongamento da planta e não necessariamente sua qualidade fisiológica (Robinson, 2023).

4.4 CONCLUSÃO

Dentre os biofertilizantes avaliados, o BAVAR+K apresentou o maior potencial para recomendação em viveiros comerciais, promovendo os maiores valores de altura, MST, MSPA, MSR e IQD, enquanto o BAVAR+N também apresentou desempenho promissor. Em contraste, o BAVAR+P, o MIX NPK e o controle apresentaram desempenho inferior, indicando que biofertilizantes específicos podem ser mais eficientes que formulações combinadas para o crescimento inicial de mudas de *C. citriodora*.

Os resultados confirmam que biofertilizantes específicos, especialmente os solubilizadores de potássio e fixadores de nitrogênio, constituem alternativas promissoras para a produção de mudas de *C. citriodora*. Embora os mecanismos envolvidos não tenham sido avaliados diretamente, é provável que os efeitos observados resultem da atuação conjunta da maior disponibilidade de nutrientes e da produção de metabólitos promotores de crescimento. Apesar dos avanços observados aos 60 dias, os valores de IQD ainda não atingiram níveis considerados ideais, indicando que um período experimental mais longo poderá proporcionar maior desenvolvimento do diâmetro do coleto, do sistema radicular, do acúmulo de biomassa e da qualidade das mudas. Dessa forma, estudos futuros devem incluir avaliações em períodos mais longos, diferentes doses e frequências de aplicação, além de ensaios em campo e análises microbiológicas e nutricionais, visando compreender os mecanismos de ação dos biofertilizantes e validar sua aplicação em escala comercial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, O. A.; YUSOFF, M. M.; MISRAN, A.; WAHAB, P. E. M.; MUTTALEB, Q. A. Root-shoot ratio and its relationships with physiological characteristics, growth and biomass yield of *Gynura procumbens* under different shade levels and plant density. **Bionatura**, v. 9, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21931/RB/2024.09.01.52>.
- ALOO, B. N.; TRIPATHI, V.; MAKUMBA, B. A.; MBEGA, E. R. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1002448, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1002448>.
- BARBOSA, K. J. C.; BIOTECH BRASIL, G.; GENTIL, K. T. Corn cultivation (BRS 2022) submitted to NPK mineral fertilization and soil conditioning bacteria. **Journal of Interdisciplinary Debates**, v. 2, n. 04, 2021. DOI: <https://doi.org/10.51249/jid.v2i04.580>.
- BASU, A.; PRASAD, P.; DAS, S. N.; KALAM, S.; SAYYED, R. Z.; REDDY, M. S.; EL ENSHASY, H. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Green Bioinoculants: Recent Developments, Constraints, and Prospects. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1140, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031140>.
- CAMPOS, T. S.; SANTOS, S. W.; OLIVEIRA, V. J. D. Uso de bioestimulantes no incremento da produtividade de grãos. **Revista Agrotecnologia - Agrotec**, v. 11, n. 1, p. 9-15, 2020.
- CHÁVEZ, J. E. C.; TAMAYO, A. K. L.; SANANGO, H. G.; GARCÍA, G. A. C.; SACÓN, Á. F. C. Growth and quality of *Arabica* coffee plants with the application of biochar and biofertilizers in the nursery. **Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences**, v. 38, n. 1, p. 3-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5555/20230387353>.
- CRAWLEY, Michael J. **The R Book**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2012.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, v. 36, n. 1, p. 10–13, 1960. DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>.
- DIONISIO, L. F. S.; SCHWARTZ, G.; SÁ DE ALMEIDA, M. J.; ROCHA, T. S.; CORVERA, R. Effects of pruning and recipient volume on seedlings' quality of *Bertholletia excelsa* Bonpl. (Lecythidaceae). **European Academic Research**, v. 9, n. 2, p. 1198-1212, 2021.
- DUSHIMIMANA, C.; MAGOMERE, T.; MULATYA, J.; VANDENABEELE, J.; OLUBAYO, F.; SMAGGHE, G.; WERBROUCK, S. P. O. Variation of morphological traits and quality indices of micropropagated *Melia volkensii* Gürke clones before field planting. **Forests**, v. 13, n. 2, p. 337, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020337>.
- ELNAHAL, S. M.; EL-SAADONY, M. T.; SAAD, A. M.; DESOKY, E. M.; EL-TAHAN, A. M.; RADY, M. M.; ABUQAMAR, S. F.; EL-TARABILY, K. A. The use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: A review. **European Journal of Plant Pathology**, v. 162, p. 759–792, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02393-7>.

FAO – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA. **The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems**. Roma: FAO, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc7724en>. Acesso em: 8 mai. 2025.

GREEN BIOTECH INCORPORATION, LTD. About Green Biotech Incorporation, LTD. [S.l.], [2025]. Disponível em: <https://greenbiotech-co.com>. Acesso em: 08 mai. 2025.

GROSSNICKLE, S. C.; MACDONALD, J. E. Why seedlings grow: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 49, p. 1–34, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4>.

HEALEY, A. L.; LUPOI, J. S.; LEE, D. J.; SYKES, R. W.; GUENTHER, J. M.; TRAN, K.; DECKER, S. R.; SINGH, S.; SIMMONS, B. A.; HENRY, R. J. Effect of aging on lignin content, composition and enzymatic saccharification in *Corymbia* hybrids and parental taxa between years 9 and 12. **Biomass and Bioenergy**, v. 93, p. 50–59, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.016>.

HUSSEY, Steven G. Transcriptional regulation of secondary cell wall formation and lignification. **Advances in Botanical Research**, v. 104, 2022, p. 317-361. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2022.03.007>.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2024**. Brasília, DF: Ibá, 2024. 120 p. Disponível em: < <https://iba.org/relatorio2024.pdf> >. Acesso em: 8 mai. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados meteorológicos da estação automática de Gurupi (A019)**. Brasília, DF: INMET, 2026. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A019>. Acesso em: 2 jun. 2026.

MA, Q. H. Lignin biosynthesis and its diversified roles in disease resistance. **Genes**, v. 15, n. 3, p. 295, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes15030295>.

MAIA, S.; SMIDERLE, O. J.; SOUZA, A. G.; TORRES, S. B.; BENEDITO, C. P. Uso de tetrazolio en la viabilidad de semillas y biorreguladores en la emergencia de plántulas de araçá-boi (*Eugenia stipitata* McVaugh). **Cultivos Tropicales**, v. 45, n. 2, 2024. Disponível em: <https://cu-id.com/2050/v45n2e08>.

MAITRA, S.; BRESTIC, M.; BHADRA, P.; SHANKAR, T.; PRAHARAJ, S.; PALAI, J. B.; SHAH, M. M. R.; BAREK, V.; ONDRISIK, P.; SKALICKÝ, M.; HOSSAIN, A. Bioinoculants - Natural Biological Resources for Sustainable Plant Production. **Microorganisms**, v. 10, n. 1, p. 51, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010051>.

MESSA, V. R. Biocontrol by induced systemic resistance using plant growth promoting rhizobacteria. **Rhizosphere**, v. 17, p. 100323, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100323>.

NEJATZADEH, F. Effect of biofertilizer and magnesium sulfate on the components of essential oil of *Dracocephalum moldavica*. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 27, p. 101671, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101671>.

OLIVEIRA, A. M.; ABREU, C. M.; GRAZZIOTTI, P. H.; ANDRADE, G. F. P.; GOMES, J. V.; AVELINO, N. R.; MENEZES, J. F. S.; BARROSO, G. M.; SANTOS, J. B.; COSTA, M. R. Production of seedlings of *Corymbia citriodora* inoculated with endophytic bacteria. **Forests**, v. 15, n. 6, p. 905, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15060905>.

PÉREZ-ÁLVAREZ, S.; OCHOA-CHAPARRO, E. H.; ANCHONDO-PÁEZ, J. C.; ESCOBEDO-BONILLA, C. M.; RASCÓN-SOLANO, J.; MAGALLANES-TAPIA, M. A.; URANGA-VALENCIA, L. P.; HERNÁNDEZ-CAMPOS, R.; SÁNCHEZ, E. Nitrogen assimilation, biomass, and yield in response to application of algal extracts, *Rhizobium* sp., and *Trichoderma asperellum* as biofertilizers in hybrid maize. **Nitrogen**, v. 5, n. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/nitrogen5040066>.

PIRTTILÄ, A. M.; PARAST TABAS, H. M.; BARUAH, N.; KOSKIMÄKI, J. J. Biofertilizers and Biocontrol Agents for Agriculture: How to Identify and Develop New Potent Microbial Strains and Traits. **Microorganisms**, v. 9, n. 4, p. 817, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9040817>.

QI, Y.; WEI, W.; CHEN, C.; CHEN, L. Plant root-shoot biomass allocation over diverse biomes: A global synthesis. **Global Ecology and Conservation**, v. 18, p. e00606, Apr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00606>.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>.

RAIMAM, M. P.; CASTRO, G. L. S.; RODRIGUES, G. R.; MORAES, A. J. G.; SILVA, G. B. Inoculation of *Bacillus* sp. improves root architecture, gas exchange and efficiency of nutrient use in *Corymbia* seedlings. **Scientia Horticulturae**, v. 338, p. 113756, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113756>.

REYES, S., J. T.; MUÑOZ FLORES, H. J.; PÉREZ D., C. M. Á.; RUEDA SÁNCHEZ, A.; HERNÁNDEZ RAMOS, J. Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero “Morelia”, estado de Michoacán. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, v. 5, n. 26, p. 103-110, 2014.

RIBEIRO, A. S. N.; CHAGAS JUNIOR, A. F.; CHAGAS, L. F. B.; MARTINS, A. L. L.; ALMEIDA, L. B.; NOBREGA, G. S.; SILVA, D. B.; ALVES, M. V. G. Efficiency of *Trichoderma* and *Bacillus subtilis* as growth promoters in eucalyptus *Corymbia citriodora*. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 11, p. 20380–20397, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv21n11-097>

RIBEIRO, A. S. N.; CHAGAS, L. F. B.; NOBREGA, G. S.; SILVA, D. B.; ALVES, M. V. G. Microorganisms promoting plant growth in *Eucalyptus urograndis*. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v.23, n.2, p.01-21, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv23n2-136>.

ROBINSON, D. OPT-ing out: Root–shoot dynamics are caused by local resource capture and biomass allocation, not optimal partitioning. **Plant, Cell & Environment**, v. 46, n. 10, p. 3023-3039, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.14470>.

SEENIVASAGAN, R.; BABALOLA, O. O. Utilization of microbial consortia as biofertilizers and biopesticides for the production of feasible agricultural product. **Biology**, v. 10, n. 11, p. 1111, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology10111111>.

SEPLAN-TO – Secretaria do Planejamento e Orçamento do Estado do Tocantins. **Base Temática do Estado do Tocantins**. Geodados vetoriais sobre aspectos físico-bióticos, clima, cobertura e uso do solo. Palmas: SEPLAN-TO, 2021. Disponível em: <https://geoportal.to.gov.br/gvsigonline/>. Acesso em: mai. 2025.

SHIMIZU, J. S.; MARUBAYASHI, L. F.; GONÇALVES, P. S. L. **AgroR: Statistical package for agricultural research**. 2024. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=AgroR>.

SILVA, T. R. R.; MILHOMEM, C. A.; SILVA, D. C. V.; DIAS, F. F.; SILVA, C. M.; CABRAL, V. B.; BARDALES-LOZANO, R. M.; SCHWARTZ, G.; DIONISIO, L. F. S. Seedling quality of *Cordia trichotoma* under different container volumes and fertilizers. **Brazilian Journal of Biology**, v. 85, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.288394>.

SOUSA, F. G.; MIELKE, K. C.; CALDEIRA, D. R. M.; BALDANI, V. L. D.; BALDANI, J. I.; SILVA, R. F. Genetic diversity and inoculation of plant-growth promoting diazotrophic bacteria for production of *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Australian Journal of Crop Science**, v.16, n.1, p.35-44, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.01.p2953>.

WANG, H.; LIU, R.; YOU, M. P.; BARBETTI, M. J.; CHEN, Y. L. Pathogen biocontrol using plant growth-promoting bacteria (PGPR): Role of bacterial diversity. **Microorganisms**, v. 9, n. 9, p. 1988, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091988>.

WEI, Z.; HOFFLAND, E.; ZHUANG, M.; HELLEGERS, P.; CUI, Z. Organic inputs to reduce nitrogen export via leaching and runoff: A global meta-analysis. **Environmental Pollution**, v. 291, p. 118176, 15 dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118176>.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant graphics for data analysis**. New York: Springer, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>.

ZHANG, R.; LI, Y.; ZHAO, X.; DEGEN, A. A.; LIAN, J.; LIU, X.; LI, Y.; DUAN, Y. Fertilizers have a greater impact on the soil bacterial community than on the fungal community in a sandy farmland ecosystem, Inner Mongolia. **Ecological Indicators**, v. 140, p. 108972, jul. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108972>.

5 DESEMPENHO MORFOFISIOLÓGICO E QUALIDADE DE MUDAS DE *Eucalyptus urophylla* SUBMETIDAS À APLICAÇÃO DE BIOFERTILIZANTES MICROBIANOS

RESUMO

A produção de mudas de *Eucalyptus urophylla* de alta qualidade é determinante para o sucesso de plantios florestais, sendo a fase de viveiro muito importante para o estabelecimento inicial das plantas. Nesse contexto, objetivou-se avaliar o efeito de biofertilizantes microbianos (BARVAR+N, BARVAR+P, BARVAR+K, MIX NPK e controle) sobre o desempenho morfológico, biométrico e fisiológico de mudas de *E. urophylla* em viveiro. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 5×2 (cinco tratamentos $\times$ dois tempos de avaliação: 30 e 60 dias). Foram avaliados parâmetros morfológicos (altura e diâmetro do coleto), biométricos (volume de raiz, massa seca da parte aérea – MSPA, da raiz – MSR e total – MST) e fisiológicos (índice de lignificação – IL e Índice de Qualidade de Dickson – IQD). Entre 30 e 60 dias, observou-se incremento médio de 81,93% na altura e 23,27% no diâmetro do coleto, independentemente do tratamento. As variáveis biométricas apresentaram interação significativa entre tratamento e tempo, com aumento médio de 149,37% no volume de raiz, 345,62% na MSPA, 246,41% na MSR e 310,24% na MST. Aos 60 dias, os tratamentos BARVAR+K e BARVAR+N apresentaram os maiores valores de MST (0,2096 g e 0,1932 g, respectivamente), além de maior volume radicular (até 2,30 mL) e relações MSPA/MSR mais próximas do equilíbrio. O IQD aumentou de valores iniciais entre 0,006 e 0,013 aos 30 dias para até 0,11 no tratamento BARVAR+K e 0,09 no BARVAR+N aos 60 dias. O IL apresentou redução significativa ao longo do tempo em parte dos tratamentos, com queda de 0,95 para 0,42 no BARVAR+K, indicando maior equilíbrio entre crescimento e lignificação. Conclui-se que os biofertilizantes microbianos específicos, especialmente BARVAR+K e BARVAR+N, induziram maior acúmulo de biomassa, melhor desenvolvimento radicular e maior qualidade fisiológica das mudas de *E. urophylla*.

Palavras-chaves: Barvar. Parâmetros biométricos. Parâmetros fisiológicos. Parâmetros morfológicos. Viveiro florestal.

MORPHOPHYSIOLOGICAL PERFORMANCE AND QUALITY OF *Eucalyptus urophylla* SEEDLINGS SUBJECTED TO THE APPLICATION OF MICROBIAL BIOFERTILIZERS

ABSTRACT

The production of high-quality *Eucalyptus urophylla* seedlings is crucial for the success of forest plantations, with the nursery phase being very important for the initial establishment of the plants. In this context, the objective was to evaluate the effect of microbial biofertilizers (BARVAR+N, BARVAR+P, BARVAR+K, NPK MIX and control) on the morphological, biometric and physiological performance of *E. urophylla* seedlings in a nursery. The experiment was conducted in a greenhouse, in a completely randomized design (CRD), in a 5×2 factorial scheme (five treatments $\times$ two evaluation times: 30 and 60 days). Morphological parameters (height and stem diameter), biometric parameters (root volume, shoot dry mass – SDM, root dry mass – RDM and total dry mass – TDM) and physiological parameters (lignification index – IL and Dickson Quality Index – DQI) were evaluated. Between 30 and 60 days, an average

increase of 81.93% in height and 23.27% in stem diameter was observed, regardless of treatment. Biometric variables showed a significant interaction between treatment and time, with an average increase of 149.37% in root volume, 345.62% in root mass per hemisphere (RMH), 246.41% in root stem mass (RSM), and 310.24% in root mass per square meter (RMS). At 60 days, the BARVAR+K and BARVAR+N treatments showed the highest RSM values (0.2096 g and 0.1932 g, respectively), as well as greater root volume (up to 2.30 mL) and RMH/RSM ratios closer to equilibrium. The root quality index (IQD) increased from initial values between 0.006 and 0.013 at 30 days to up to 0.11 in the BARVAR+K treatment and 0.09 in the BARVAR+N treatment at 60 days. The IL (Index of Lignification) showed a significant reduction over time in some treatments, dropping from 0.95 to 0.42 in BARVAR+K, indicating a better balance between growth and lignification. It is concluded that the specific microbial biofertilizers, especially BARVAR+K and BARVAR+N, induced greater biomass accumulation, better root development, and higher physiological quality of *E. urophylla* seedlings.

Keywords: Barvar. Biometric parameters. Physiological parameters. Morphological parameters. Forest nursery.

5.1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva do eucalipto constitui um dos pilares da silvicultura brasileira, com aproximadamente 8,1 milhões de hectares plantados, correspondendo a cerca de 79,2% da área total de florestas plantadas no país. Em 2024, o setor florestal movimentou mais de R\$ 240 bilhões, gerando cerca de 2,69 milhões de empregos diretos e indiretos, com destaque para a produção de celulose, papel, painéis de madeira e biomassa energética (IBÁ, 2025).

Nesse contexto, *Eucalyptus urophylla* destaca-se pela ampla adaptabilidade edafoclimática, alta tolerância e resistência a estresses abióticos e alto potencial produtivo, sendo amplamente utilizado em plantios comerciais, na formação de híbridos e em programas de melhoramento genético. O sucesso desses plantios depende diretamente da qualidade das mudas, uma vez que características morfológicas e fisiológicas adequadas condicionam o estabelecimento inicial, a sobrevivência em campo e o desempenho silvicultural ao longo do ciclo (Ekonomo *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022).

A produção de mudas florestais no Brasil baseia-se majoritariamente na adubação mineral convencional, a qual enfrenta desafios relacionados ao alto custo dos fertilizantes, à dependência de importações, e às perdas de nutrientes por lixiviação e volatilização (Jardim *et al.*, 2024). Estima-se que até 50% do nitrogênio aplicado possa ser perdido, reduzindo a eficiência de uso dos insumos (Lee; Ku, 2025). Além disso, o manejo exclusivamente mineral pode simplificar a microbiota rizosférica, limitando processos naturais de ciclagem de nutrientes e de proteção das plantas contra estresses bióticos e abióticos (Tian *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023).

Nesse cenário, biofertilizantes microbianos e rizobactérias promotoras de crescimento vegetal são alternativas capazes de associar produtividade e sustentabilidade. Esses insumos atuam por meio da fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo e potássio, produção de fitormônios, síntese de sideróforos e indução de resistência sistêmica (Basu *et al.*, 2021; Chandran; Meena; Swapnil, 2021; Aloo *et al.*, 2022). Estudos com espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* relatam incrementos expressivos na biomassa, associados a melhorias no volume e na arquitetura radicular e ao aumento do Índice de Qualidade de Dickson (IQD), demonstrando o potencial da microbiota do substrato para elevar a qualidade das mudas (Azevedo *et al.*, 2022; Nwigwe *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2025).

Apesar dos avanços no uso de microrganismos promotores de crescimento em espécies florestais, ainda são escassos os estudos que comparem, de forma integrada, formulações microbianas com funções nutricionais distintas, voltadas à disponibilização de nitrogênio, fósforo e potássio, bem como suas combinações. Além disso, a maioria dos trabalhos concentra-se em variáveis isoladas de crescimento, com menor enfoque na avaliação conjunta de parâmetros morfológicos, biométricos e fisiológicos relacionados à qualidade das mudas. Dessa forma, ainda não está completamente esclarecido como diferentes formulações microbianas influenciam o equilíbrio entre crescimento, acúmulo de biomassa e qualidade morfofisiológica de mudas de *E. urophylla*, justificando a realização deste estudo (Basu *et al.*, 2021; Chandran; Meena; Swapnil, 2021; Aloo *et al.*, 2022; Nwigwe *et al.*, 2023).

Dessa forma, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho morfológico, biométrico e fisiológico de mudas de *E. urophylla* aos 30 e 60 dias, submetidas à aplicação de diferentes formulações de biofertilizantes microbianos (Barvar[®] N, P, K e sua combinação Mix NPK), em comparação ao controle sem inoculação. Parte-se da hipótese de que inoculantes específicos para nitrogênio e potássio induzam maior acúmulo de biomassa, melhor desenvolvimento radicular e índices de qualidade superiores ao manejo convencional, constituindo alternativa promissora para a produção de mudas florestais de alta qualidade.

5.2 METODOLOGIA

5.2.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação pertencente ao Centro de Monitoramento Ambiental e Manejo do Fogo (CeMAF), vinculado à Universidade Federal do Tocantins (UFT), campus de Gurupi – TO, localizado nas coordenadas 11°43'45" S e 49°04'07"

O. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima regional é do tipo Aw (tropical com estação seca no inverno), caracterizado por invernos secos e verões chuvosos, com temperatura média anual em torno de 27 °C e precipitação média anual de aproximadamente 1.800 mm (SEPLAN, 2021). Durante o período experimental, a temperatura média foi de 28,0 °C e a precipitação acumulada foi de 34,2 mm, sendo registradas médias mensais de 27,5 °C e 0 mm de precipitação em setembro, e 28,4 °C e 34,2 mm em outubro (INMET, 2026).

As sementes de *E. urophylla* utilizadas no estudo foram obtidas de lote experimental previamente beneficiado e armazenado em câmara fria (≈ 20 °C) até o momento da instalação do experimento. A semeadura foi realizada em tubetes de polipropileno com volume de 55 cm³, preenchidos com substrato comercial Bioflora[®] Plant Ciclos Germinar. Esse substrato é composto por mistura de materiais orgânicos e minerais, incluindo casca de Pinus compostada, vermiculita expandida, areia de quartzo, calcário dolomítico, gesso agrícola, fosfato natural, termofosfato, torta de mamona, farinha de osso, fertilizantes fosfatados solúveis e micronutrientes. Apresenta pH de 5,0, condutividade elétrica de 2,0 mS cm⁻¹ (diluição 1:5), densidade de 300 kg m⁻³ (base seca) e capacidade de retenção de água de 130% (m/m).

As bandejas contendo os tubetes foram mantidas em viveiro com 50% de sombreamento, sob irrigação automática por microaspersão, com quatro regas diárias, de modo a garantir umidade adequada para germinação e desenvolvimento inicial das mudas. O período total do experimento foi de 60 dias, com avaliações realizadas aos 30 e 60 dias após a aplicação dos tratamentos.

5.2.2 Delineamento experimental

O experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado (DIC), utilizando-se um arranjo fatorial 5 × 2, composto por cinco tratamentos e dois tempos de avaliação, correspondentes a 30 e 60 dias após a aplicação dos biofertilizantes. Cada combinação biofertilizante × tempo foi constituída por cinco repetições, sendo cada repetição formada por cinco plantas, totalizando 25 plantas avaliadas por tempo e 50 unidades experimentais ao longo do experimento.

Os tratamentos consistiram na aplicação de diferentes formulações comerciais de biofertilizantes, além de um tratamento controle sem aplicação. Foram avaliadas formulações com ação específica na fixação biológica de nitrogênio (BARVAR+N), na solubilização de fósforo (BARVAR+P) e na solubilização de potássio (BARVAR+K), bem como um tratamento MIX NPK, obtido pela combinação das três formulações anteriores. O tratamento controle foi

conduzido sem inoculação, permitindo a comparação direta com as plantas submetidas aos biofertilizantes.

Os biofertilizantes utilizados são produtos desenvolvidos pela empresa GreenBiotech, sediada em Teerã, Irã, formulados a partir de uma matriz composta por bagaço de cana-de-açúcar (30%), perlita (30%) e água (30%), acrescida de 10% de microrganismos específicos, selecionados de acordo com a função nutricional de cada produto. A formulação BARVAR+N contém a cepa 04 de *Azotobacter vinelandii* (10^7 – 10^8 UFC g⁻¹), bactéria aeróbica de vida livre, capaz de fixar nitrogênio atmosférico mesmo sob condições adversas de salinidade, ampla variação de pH e temperaturas elevadas.

A formulação BARVAR+P é constituída por cepas de *Pseudomonas putida* e *Pantoea agglomerans* (10^7 – 10^8 UFC g⁻¹), microrganismos solubilizadores de fósforo que atuam por meio da secreção de ácidos orgânicos e enzimas fosfatases, promovendo a liberação de íons fosfato a partir de compostos orgânicos e inorgânicos pouco solúveis. Já a formulação BARVAR+K contém cepas de *P. vancouverensis* e *P. koreensis* (10^7 – 10^8 UFC g⁻¹), bactérias responsáveis pela solubilização de compostos insolúveis de potássio, favorecendo a liberação desse nutriente na região da rizosfera.

Os biofertilizantes Barvar[®] N, P e K foram selecionados por apresentarem formulações microbianas direcionadas à disponibilização de nutrientes essenciais ao crescimento vegetal, incluindo processos de fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo e mobilização de potássio. A inclusão do tratamento MIX NPK permitiu avaliar o efeito combinado desses mecanismos biológicos sobre o crescimento inicial das mudas de *E. urophylla*. A comparação entre formulações individuais e combinadas possibilitou identificar potenciais efeitos sinérgicos dos microrganismos na produção de mudas florestais.

5.2.3 Preparo e aplicação das soluções

Para o preparo das soluções inoculantes, 10 g de cada produto (BARVAR+N, BARVAR+P e BARVAR+K) foram suspensos em 100 mL de solução salina estéril (NaCl 0,85%), sob agitação vigorosa para completa homogeneização. O tratamento MIX NPK foi obtido pela mistura de 10 mL de cada uma das três soluções (N, P e K) em tubo estéril, seguido de agitação em agitador tipo vortex ($\approx$ 2 min).

A aplicação dos biofertilizantes foi realizada no dia da instalação do experimento, utilizando pipeta automática calibrada. Em cada tubete foram aplicados 1 mL da solução correspondente ao tratamento, diretamente sobre o substrato próximo ao sistema radicular das

mudas. No tratamento controle não houve aplicação de qualquer produto biológico, mantendo-se apenas as condições padrão de irrigação e manejo adotadas para os demais tratamentos.

5.2.4 Variáveis analisadas

As avaliações foram realizadas aos 30 e 60 dias após o transplântio, contemplando variáveis morfológicas, biométricas e fisiológicas. Esses períodos foram escolhidos por representarem fases diferentes do desenvolvimento inicial das mudas em viveiro. A avaliação aos 30 dias permitiu verificar os efeitos iniciais dos biofertilizantes sobre o estabelecimento das mudas, enquanto a avaliação aos 60 dias possibilitou identificar respostas acumuladas decorrentes da colonização microbiana e do crescimento vegetal. Dessa forma, foi possível acompanhar a dinâmica temporal das respostas morfológicas e fisiológicas ao longo da fase de formação das mudas.

Entre os parâmetros morfológicos, foram mensuradas a altura da planta (HT, cm), determinada com régua graduada do colo ao ápice, e o diâmetro do coleto (DC, mm), aferido na região de transição entre o caule e o sistema radicular, utilizando paquímetro digital.

Os parâmetros biométricos incluíram a massa seca da parte aérea (MSPA, g), a massa seca do sistema radicular (MSR, g), o volume de raiz (VR, mL), a massa seca total (MST, g), bem como as relações MSPA/MSR e altura/diâmetro do coleto (HT/DC), utilizadas como indicadores da alocação de biomassa e do equilíbrio morfoestrutural das mudas. A relação MSPA/MSR foi utilizada como indicador do balanço entre a biomassa da parte aérea e do sistema radicular, estando associada à capacidade de absorção de água e nutrientes e ao potencial de estabelecimento das mudas após o transplântio. O VR foi determinado pelo método de deslocamento de água, adaptado de Rossiello *et al.* (1995). Após a lavagem das raízes para remoção do substrato aderido, o sistema radicular foi completamente imerso em uma proveta graduada de 100 mL. O volume das raízes foi obtido pela diferença entre o volume inicial e o volume final registrado após a imersão, sendo o volume final expresso em mililitros.

Para a obtenção da biomassa seca, foram selecionadas cinco plantas por tratamento, de forma aleatória. As plantas foram separadas em parte aérea e sistema radicular por meio de corte na região do diâmetro do coleto e, posteriormente, submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C por 72 horas, ou até atingirem massa constante. Após a secagem, as amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,001 g, permitindo a determinação de MSPA, MSR e MST.

Entre os índices fisiológicos, foi avaliado o índice de lignificação (IL), calculado pela razão entre a massa seca total e a massa úmida total da planta, conforme metodologia adaptada de Silva *et al.* (2025) (Equação 1).

$$IL (\%) = \frac{MST}{MFT} * 100 \quad (1)$$

Também foi determinado o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), amplamente empregado na avaliação da qualidade de mudas por integrar características da parte aérea e do sistema radicular. O IQD é amplamente utilizado como indicador integrado da qualidade de mudas, por considerar simultaneamente atributos morfológicos e biométricos relacionados ao vigor e à robustez das plantas. O IQD foi calculado de acordo com a equação proposta por Dickson *et al.* (1960) (Equação 2):

$$DQI = \frac{TDM (g)}{\frac{H (cm)}{SD (mm)} + \frac{SDM (g)}{RDM (g)}} \quad (2)$$

Em que: IQD = Índice de Qualidade de Dickson; TDM (*Total Dry Mass*) = massa seca total da muda (g); H (*Height*) = altura da muda (cm); SD (*Stem Diameter*) = diâmetro do coleto (mm); SDM (*Shoot Dry Mass*) = massa seca da parte aérea (g); RDM (*Root Dry Mass*) = massa seca das raízes (g).

Além das análises descritivas, foi realizada a correlação de Pearson entre as variáveis morfológicas, biométricas e fisiológicas, com o intuito de identificar associações lineares significativas entre os parâmetros avaliados e compreender as inter-relações entre crescimento, alocação de biomassa e qualidade fisiológica das mudas.

Como todas as mudas foram produzidas no mesmo substrato, sob as mesmas condições de irrigação, manejo e ambiente de viveiro, as diferenças observadas entre os tratamentos podem ser atribuídas predominantemente à aplicação dos biofertilizantes.

Como todas as mudas foram produzidas sob as mesmas condições de substrato, irrigação, manejo e ambiente de viveiro, as diferenças observadas entre os tratamentos podem ser atribuídas predominantemente à aplicação dos biofertilizantes. Entretanto, este estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. O período experimental foi restrito a 60 dias, não sendo possível avaliar o desempenho das mudas até o ponto de expedição ou após o transplante em campo. Além disso, não foram realizadas análises da colonização da rizosfera, da dinâmica dos microrganismos no substrato, da

disponibilidade de nutrientes ou da produção de metabólitos promotores de crescimento, impossibilitando a confirmação direta dos mecanismos responsáveis pelos efeitos observados. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como evidências indiretas da ação dos inoculantes sobre o crescimento e a qualidade das mudas.

5.2.5 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas no software R, versão 4.0.5 (R Development Core Team, 2025). Previamente à análise de variância (ANOVA), os dados foram avaliados quanto ao atendimento dos pressupostos estatísticos, sendo a normalidade dos resíduos verificada pelo teste de Shapiro–Wilk ($p > 0,05$), complementada por inspeção visual de gráficos de probabilidade normal (QQ-plot) (Crawley, 2012), e a homogeneidade de variâncias avaliada pelo teste de Bartlett ($p > 0,05$). A independência entre as unidades experimentais foi assegurada pelo delineamento adotado.

Atendidos os pressupostos, os dados foram submetidos à ANOVA fatorial, avaliando-se os efeitos de Tratamento, Tempo e da interação Tratamento $\times$ Tempo. Quando constatadas diferenças significativas ($p \leq 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, utilizando-se a função *fat2.crd*, dos pacotes *ExpDes* e *AgroR*, apropriados para experimentos em delineamento inteiramente casualizado. Para investigar associações lineares entre as variáveis, foi calculado o coeficiente de correlação de *Pearson*, com base nas médias agrupadas por tratamento e repetição, considerando significância estatística ao nível de $p \leq 0,05$.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Parâmetros morfológicos

A análise de variância mostrou interação significativa entre tratamentos microbiológicos e períodos de avaliação para altura da planta e diâmetro do coleto (Tabela 2). Além disso, o tempo influenciou significativamente ambas as variáveis ($p < 0,05$), conforme o crescimento das mudas entre 30 e 60 dias após o transplântio (Figura 6). O coeficiente de variação foi de 10,7% para altura da planta e 11,2% para diâmetro do coleto.

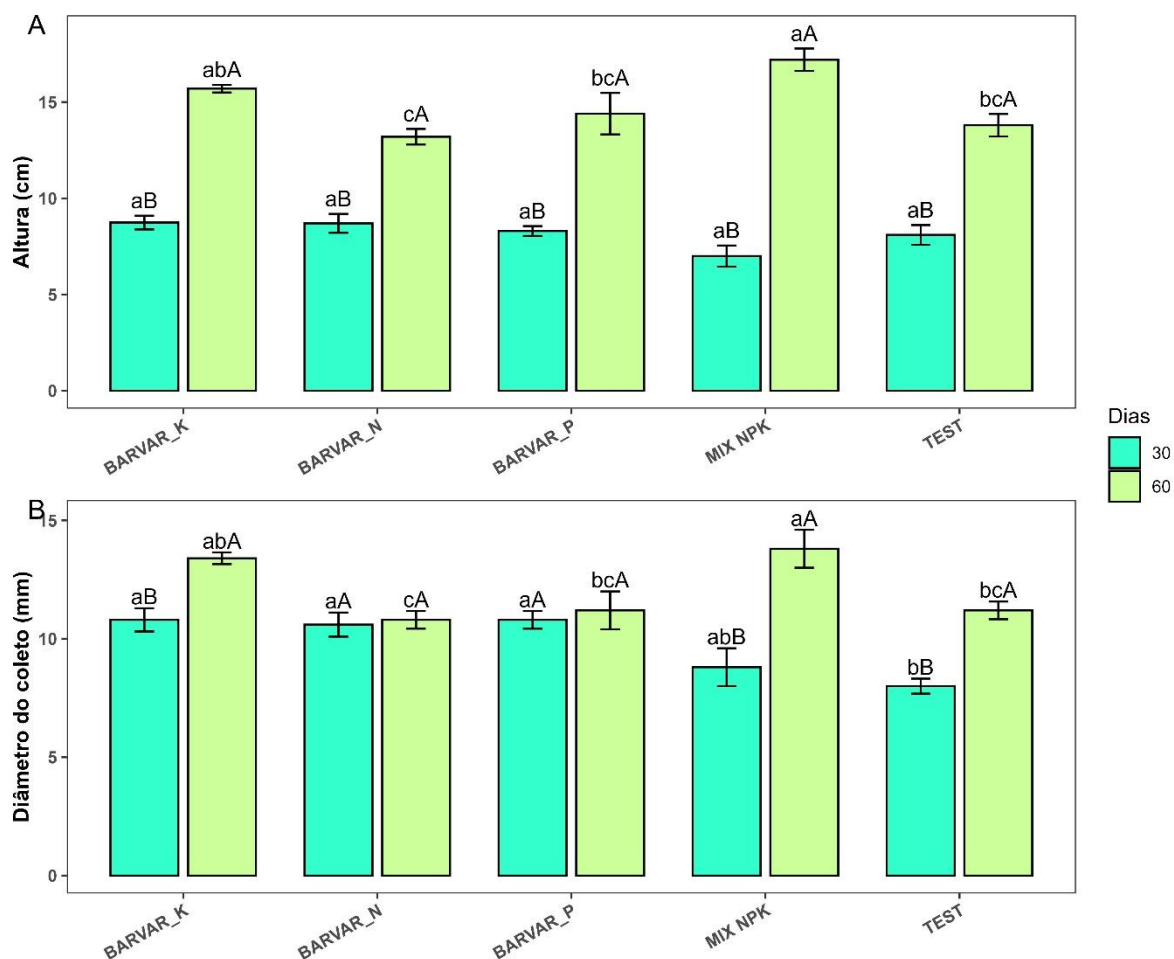
Tabela 2 - Resumo da análise de variância para altura da planta (HT) e diâmetro do coleto (DC) de mudas de *E. urophylla* submetidas a diferentes biofertilizantes microbianos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplântio

Fonte de variação	GL	QM (HT)	p-valor	QM (DC)	p-valor
Tratamento	4	3,76	0,0594	8,33	0,0012
Tempo	1	559,79	< 0,0001	64,98	< 0,0001
Tratamento × Tempo	4	11,57	0,0001	10,13	0,0003
Resíduo	40	1,52	—	1,5	—

Fonte: Autora (2026).

Observou-se que o efeito isolado dos tratamentos sobre a altura das mudas não foi significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p = 0,0594$), embora tenha apresentado tendência à significância. Em contrapartida, o fator tempo e a interação entre tratamento e tempo foram significativos ($p < 0,05$), indicando que a resposta das mudas aos biofertilizantes variou ao longo do período experimental. Para o diâmetro do coleto, tanto os efeitos principais quanto a interação foram significativos ($p < 0,05$), influência dos biofertilizantes e do tempo de avaliação sobre essa variável.

Figura 6 - Altura da planta (cm) e diâmetro do coleto (mm) de mudas de *E. urophylla* submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplântio



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Em que: A) Altura da planta em função dos tratamentos; (B) Altura da planta em função do tempo; (C) Diâmetro do coleto em função dos tratamentos; (D) Diâmetro do coleto em função do tempo. Barras representam a média $\pm$ desvio-padrão. Letras distintas indicam diferença significativa entre tratamentos ou tempos de avaliação, conforme teste de Tukey ($p < 0,05$).

Aos 30 dias, a altura média das mudas variou entre 7,0 e 8,74 cm (Figura 6A). As mudas submetidas aos tratamentos BARVAR+K ($8,74 \pm 0,80$ cm), BARVAR+N ($8,70 \pm 1,10$ cm) e BARVAR+P ($8,30 \pm 0,57$ cm) apresentaram médias superiores às observadas no controle ($8,10 \pm 1,14$ cm) e no MIX NPK ($7,0 \pm 1,22$ cm). Nessa avaliação, BARVAR+K, BARVAR+N, BARVAR+P e o controle não diferiram entre si, enquanto o tratamento MIX NPK apresentou a menor média de altura, diferindo de BARVAR+K e BARVAR+N. Esse comportamento indica que, no estágio inicial de desenvolvimento, as diferenças entre os tratamentos ainda foram pouco expressivas, possivelmente em função das reservas da semente e das condições nutricionais já fornecidas pelo substrato comercial (Toca *et al.*, 2022).

Aos 60 dias, observou-se aumento expressivo da altura em todos os tratamentos (Figura 6A), com médias variando entre 13,2 e 17,2 cm. O tratamento MIX NPK apresentou a maior média absoluta ($17,2 \pm 1,30$ cm), seguido por BARVAR+K ($15,7 \pm 0,45$ cm) e BARVAR+P ($14,4 \pm 2,41$ cm), enquanto o controle atingiu $13,8 \pm 1,30$ cm. Nessa avaliação, o tratamento MIX NPK apresentou a maior média de altura, diferindo de BARVAR+N, enquanto BARVAR+K, BARVAR+P e o controle apresentaram valores intermediários, não diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Esses resultados indicam que, embora o tempo tenha sido o principal fator responsável pelo crescimento das mudas, houve diferenças na magnitude da resposta entre os tratamentos. Considerando a média geral dos tratamentos, a altura apresentou incremento de 81,93% entre 30 e 60 dias.

O maior crescimento em altura observado no tratamento MIX NPK pode estar relacionado à atuação conjunta de microrganismos com diferentes mecanismos de promoção do crescimento, como fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo e potássio e produção de fitormônios, especialmente auxinas, que estimulam o alongamento celular e o crescimento da parte aérea. Entretanto, esse incremento em altura não foi acompanhado por aumentos proporcionais na biomassa e no Índice de Qualidade de Dickson, indicando que o maior crescimento longitudinal não necessariamente resultou em mudas mais equilibradas morfofisiologicamente. Esse comportamento reforça que o crescimento em altura, quando analisado isoladamente, não é suficiente para caracterizar a qualidade das mudas, devendo ser interpretado em conjunto com parâmetros biométricos e fisiológicos, como diâmetro do coleto, acúmulo de biomassa e IQD (Dickson; Leaf; Hosner, 1960; Dushimimana *et al.*, 2022).

O diâmetro do coleto apresentou comportamento semelhante ao observado para a altura. Aos 30 dias, os valores de DC variaram entre 8,0 e 10,8 mm (Figura 6B), com maiores médias nos tratamentos BARVAR+K, BARVAR+P e BARVAR+N, enquanto o MIX NPK ($8,8 \pm 1,79$ mm) e o controle ($8,0 \pm 0,71$ mm) apresentaram os menores valores médios. Aos 60 dias, houve incremento generalizado do diâmetro do coleto, com valores entre 10,8 e 13,8 mm, destacando-se os tratamentos MIX NPK ($13,8 \pm 1,79$ mm) e BARVAR+K ($13,4 \pm 0,55$ mm). Nessa avaliação, o tratamento MIX NPK apresentou a maior média de diâmetro, diferindo de BARVAR+N, enquanto BARVAR+K, BARVAR+P e o controle apresentaram valores intermediários e não diferiram dos demais tratamentos. De forma geral, o diâmetro do coleto apresentou incremento médio de 23,27% entre 30 e 60 dias (Figura 6B).

A interação significativa entre tratamento e tempo para a altura da planta e o diâmetro do coleto demonstra que a resposta das mudas aos biofertilizantes variou ao longo do período de avaliação. De modo geral, observou-se crescimento expressivo entre 30 e 60 dias após a

aplicação dos biofertilizantes, reflexo da influência do tempo sobre o desenvolvimento inicial das mudas. A altura apresentou incremento médio de 81,93%, enquanto o diâmetro do coleto aumentou 23,27%, padrão típico de mudas florestais nos estágios iniciais, em que o crescimento longitudinal precede o espessamento do caule. Segundo Moreira *et al.* (2023), esses parâmetros são fundamentais para o estabelecimento inicial e a sobrevivência das mudas, sobretudo nos primeiros meses após o plantio.

Embora as diferenças entre os tratamentos tenham sido mais evidentes aos 60 dias, observou-se que BARVAR+K, BARVAR+P e MIX NPK apresentaram os maiores valores médios de altura, com destaque para o tratamento MIX NPK. Esse comportamento sugere um possível efeito complementar da associação entre bactérias diazotróficas e microrganismos solubilizadores de nutrientes, conforme relatado por Sousa *et al.* (2021) e Lan *et al.* (2023), que destacam a atuação de biofertilizantes na disponibilização de nutrientes e na produção de fitormônios, favorecendo o crescimento inicial das plantas.

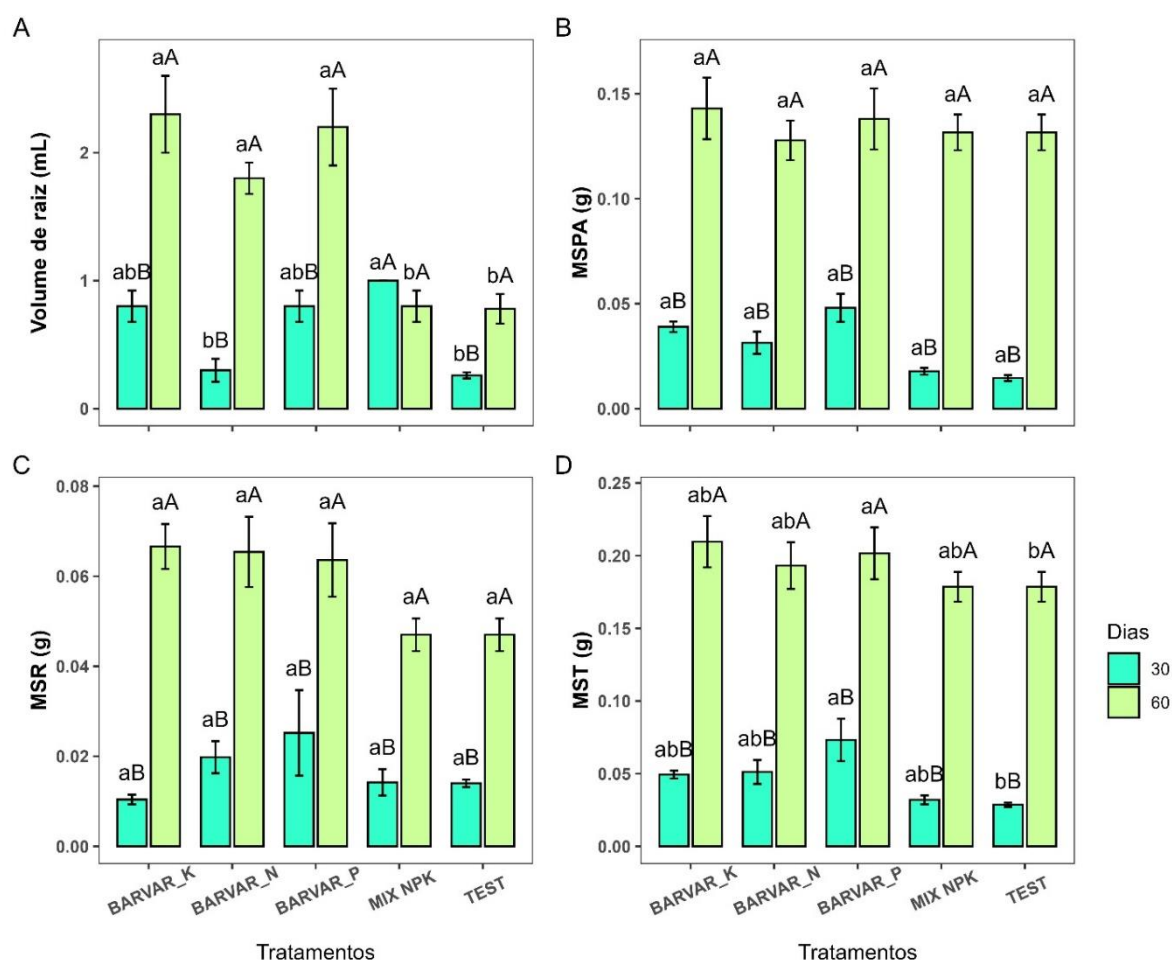
O diâmetro do coleto apresentou incremento gradual ao longo do período avaliado, comportamento consistente com a literatura. Embora o fator tempo tenha exercido forte influência sobre essa variável, diferenças entre tratamentos também foram observadas aos 60 dias, com destaque para MIX NPK e BARVAR+K, que apresentaram as maiores médias. Estudos com *E. urophylla* indicam que o diâmetro é uma variável estrutural importante para a qualidade das mudas e pode responder aos estímulos nutricionais e biológicos de forma mais lenta quando comparado a outras variáveis de crescimento (Moreira *et al.*, 2023; Sousa *et al.*, 2021). Yin *et al.* (2025) ressaltam que, embora o diâmetro apresente maior valor preditivo ao longo da rotação, sua resposta inicial também pode ser influenciada pelo manejo nutricional adotado durante a fase de viveiro.

De forma integrada, os resultados indicaram que os biofertilizantes contribuíram para o crescimento inicial das mudas de *E. urophylla*, especialmente quando avaliados em associação com o fator tempo. Embora as diferenças entre tratamentos tenham sido mais evidentes aos 60 dias, os efeitos da inoculação refletiram principalmente no incremento do crescimento das mudas. Esse padrão está de acordo com Wang *et al.* (2023), que destacam a importância do equilíbrio entre essas variáveis para a estabilidade mecânica das plantas, e reforça que os efeitos da inoculação microbiana podem se tornar mais evidentes em avaliações de maior duração ou em outros atributos relacionados à qualidade das mudas.

5.3.2 Parâmetros biométricos

Foi observada interação significativa entre os fatores tratamento e tempo para o volume de raiz (VR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR) e massa seca total (MST) ($p < 0,05$), indicando que a resposta dessas variáveis ao longo do tempo dependeu do biofertilizante aplicado (Figura 7). De forma geral, todos os tratamentos apresentaram incremento significativo dessas variáveis entre 30 e 60 dias, resultado do acúmulo progressivo de biomassa ao longo do período experimental.

Figura 7 - Volume de raiz (mL) e massas secas da parte aérea (g), da raiz (g) e total (g) de mudas de *E. urophylla* submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplântio



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Em que: (A) Volume de raiz; (B) massa seca da parte aérea; (C) massa seca de raiz; (D) massa seca total. Letras minúsculas indicam diferença significativa entre tratamentos dentro do mesmo tempo, e letras maiúsculas indicam diferença significativa entre tempos para o mesmo tratamento (teste de Tukey, $p < 0,05$).

O volume de raiz (VR) apresentou incremento expressivo entre 30 e 60 dias em todos os tratamentos, evidenciando interação significativa entre tratamento e tempo (Figura 7A). Aos

30 dias, os valores variaram de $0,26 \pm 0,05$ mL (controle) a $1,00 \pm 0,00$ mL (MIX NPK). Nessa avaliação, o tratamento MIX NPK apresentou maior volume radicular, diferindo de BARVAR+N e do controle, mas não de BARVAR+K e BARVAR+P. Aos 60 dias, observou-se aumento do volume radicular em todos os tratamentos, com maiores médias registradas para BARVAR+K ($2,30 \pm 0,67$ mL), BARVAR+P ($2,20 \pm 0,67$ mL) e BARVAR+N ($1,80 \pm 0,14$ mL), que diferiram estatisticamente de MIX NPK ($0,80 \pm 0,14$ mL) e do controle ($0,78 \pm 0,26$ mL). Houve incremento significativo do volume radicular entre 30 e 60 dias para BARVAR+K, BARVAR+N, BARVAR+P e o controle, enquanto o tratamento MIX NPK não apresentou diferença significativa entre os períodos de avaliação. Em média, o volume de raiz aumentou 149,37% entre os períodos, indicando maior exploração do substrato ao longo do tempo. Aos 60 dias, BARVAR+K, BARVAR+N e BARVAR+P apresentaram os maiores volumes radiculares, sugerindo maior eficiência na estimulação do crescimento radicular e maior potencial de absorção de água e nutrientes (Raimam *et al.*, 2024).

A massa seca da parte aérea (MSPA) também apresentou aumento significativo entre 30 e 60 dias em todos os tratamentos (Figura 7B), com incremento médio de 345,62%, o que mostra intensa alocação de biomassa para tecidos fotossintéticos. Aos 30 dias, os valores de MSPA variaram entre $0,014 \pm 0,00$ g (controle) e $0,048 \pm 0,01$ g (BARVAR+P), enquanto aos 60 dias os tratamentos convergiram para valores mais elevados, variando de $0,1278 \pm 0,02$ g (BARVAR+N) a $0,143 \pm 0,03$ g (BARVAR+K). Embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas marcantes entre tratamentos aos 60 dias, os tratamentos com biofertilizantes apresentaram valores absolutos consistentemente superiores ao controle, indicando maior eficiência na conversão de assimilados em biomassa aérea ao longo do período experimental.

Para a massa seca de raiz (MSR), foi observado incremento médio de 246,41% entre 30 e 60 dias, com diferenças claras na magnitude da resposta entre os tratamentos (Figura 7C). Aos 30 dias, os valores de MSR variaram de $0,010 \pm 0,00$ g (BARVAR+K) a $0,025 \pm 0,02$ g (BARVAR+P), enquanto aos 60 dias atingiram valores entre $0,047 \pm 0,01$ g (MIX NPK e controle) e $0,0666 \pm 0,01$ g (BARVAR+K). O maior acúmulo de biomassa radicular observado nos tratamentos BARVAR+K, BARVAR+N e BARVAR+P aos 60 dias está em consonância com os maiores valores de volume de raiz, indicando além da expansão volumétrica, a maior densidade de tecidos radiculares, característica desejável para o estabelecimento inicial das mudas.

Como reflexo do comportamento conjunto da MSPA e da MSR, a massa seca total (MST) apresentou incremento médio de 310,24% entre 30 e 60 dias, demonstrando crescimento

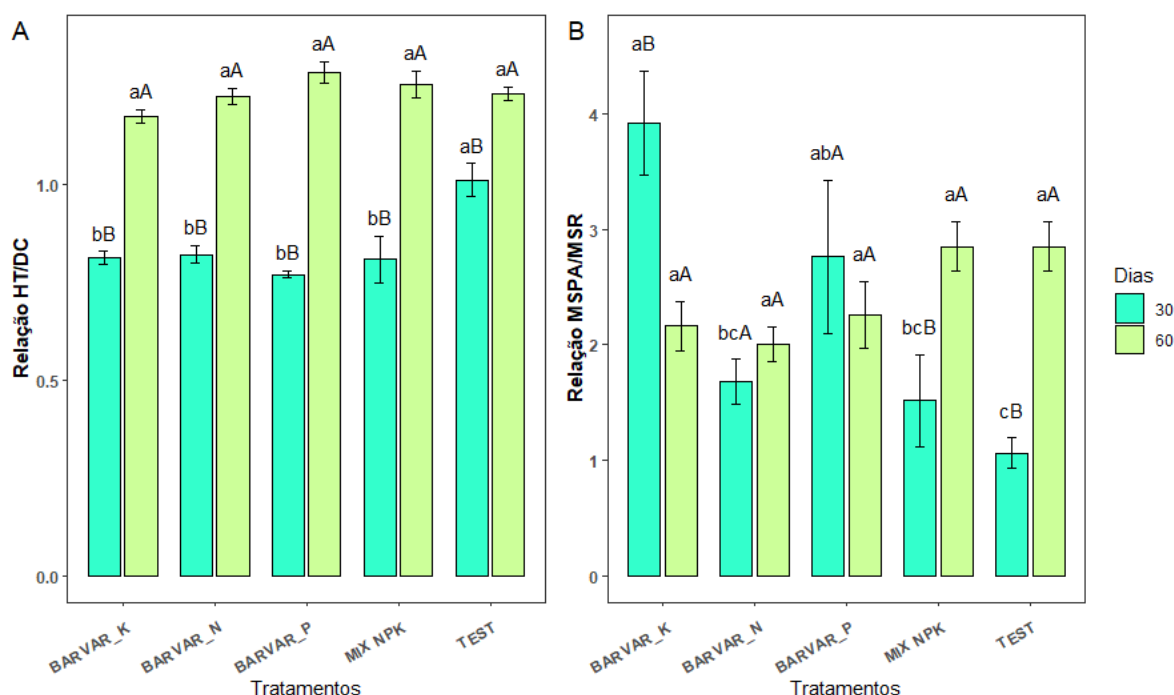
geral expressivo das mudas ao longo do período experimental (Figura 7D). Aos 30 dias, a MST variou entre $0,0286 \pm 0,00$ g (controle) e $0,0732 \pm 0,03$ g (BARVAR+P), enquanto aos 60 dias os maiores valores foram observados nos tratamentos BARVAR+K ($0,2096 \pm 0,04$ g), BARVAR+P ($0,2016 \pm 0,04$ g) e BARVAR+N ($0,1932 \pm 0,04$ g). Em contraste, os tratamentos MIX NPK e controle apresentaram menores valores de MST aos 60 dias ($0,1786 \pm 0,02$ g), indicando que a inoculação individual com microrganismos específicos foi mais eficiente para o acúmulo total de biomassa do que a aplicação combinada no período avaliado.

O incremento expressivo das variáveis radiculares e de biomassa entre 30 e 60 dias mostrou que o tempo de cultivo foi um fator determinante para o desenvolvimento das mudas, com respostas particularmente sensíveis no sistema radicular. Esse padrão está de acordo com a síntese apresentada por Toca *et al.* (2022), que destaca a elevada plasticidade do sistema radicular de espécies florestais frente à disponibilidade de nutrientes e à interação com fatores ambientais e biológicos em viveiro. Os maiores valores de volume de raiz e massa seca radicular nos tratamentos BARVAR+K e BARVAR+P sugerem que a inoculação com microrganismos solubilizadores favoreceu a exploração do substrato e a eficiência na absorção de recursos, especialmente nos estágios iniciais de desenvolvimento.

Resultados semelhantes foram observados em estudos com espécies florestais inoculadas com bactérias promotoras de crescimento, nos quais modificações na arquitetura radicular resultaram em maior acúmulo de biomassa e melhor desempenho inicial das mudas. Sousa *et al.* (2022) relataram aumentos significativos em volume, área e massa seca de raízes em mudas de *E. urophylla* inoculadas com bactérias diazotróficas, enquanto Raimam *et al.* (2024) demonstraram que a inoculação com *Bacillus* sp. em *Corymbia* proporciona ganhos em arquitetura radicular, eficiência no uso de nutrientes e qualidade das mudas. Assim, a ausência de diferenças estatísticas marcantes em algumas variáveis aéreas aos 60 dias não invalida o efeito dos tratamentos, mas indica que o estímulo inicial ocorre prioritariamente no sistema radicular, com reflexos graduais sobre a parte aérea.

Foi observada interação significativa entre tratamento e tempo para as relações altura/diâmetro do coleto (HT/DC) e massa seca da parte aérea/massa seca de raiz (MSPA/MSR) ($p < 0,05$), indicando que a dinâmica dessas relações ao longo do período experimental foi dependente do biofertilizante aplicado (Figura 8). Ambas as variáveis refletem aspectos do crescimento das mudas, permitindo avaliar o equilíbrio morfológico e a estratégia de alocação de biomassa entre os compartimentos aéreo e radicular ao longo do desenvolvimento inicial.

Figura 8 - Relação altura/diâmetro do coleto (HT/DC) e relação massa seca da parte aérea/massa seca da raiz (MSPA/MSR) de mudas de *E. urophylla* submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplântio



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Em que: (A) Relação HT/DC; (B) relação MSPA/MSR. Letras minúsculas indicam diferença significativa entre tratamentos dentro do mesmo tempo, e letras maiúsculas indicam diferença significativa entre tempos para o mesmo tratamento (teste de Tukey, $p < 0,05$).

A relação HT/DC apresentou valores mais elevados aos 30 dias, com médias variando entre $0,77 \pm 0,02$ (BARVAR+P) e $1,01 \pm 0,09$ (controle), indicando maior crescimento em altura em relação ao espessamento do coleto na fase inicial (Figura 8A). Aos 60 dias, todos os tratamentos apresentaram aumento significativo dessa relação, com valores entre $1,17 \pm 0,04$ (BARVAR+K) e $1,29 \pm 0,06$ (BARVAR+P), resultando em um incremento médio de 46,16% entre os períodos avaliados. Apesar das diferenças numéricas entre tratamentos, os valores permaneceram dentro de faixas consideradas adequadas para mudas florestais, indicando crescimento equilibrado, sem indícios de estiolamento. Esse comportamento sugere que o aumento em altura foi acompanhado por espessamento proporcional do coleto, com uma arquitetura estrutural favorável ao estabelecimento das mudas após o transplântio (Guimarães; Silva; Ferreira, 2024; Silva *et al.*, 2025).

A relação MSPA/MSR apresentou comportamento distinto, com variações marcantes entre tratamentos e ao longo do tempo (Figura 8B). Aos 30 dias, os valores variaram de $1,06 \pm$

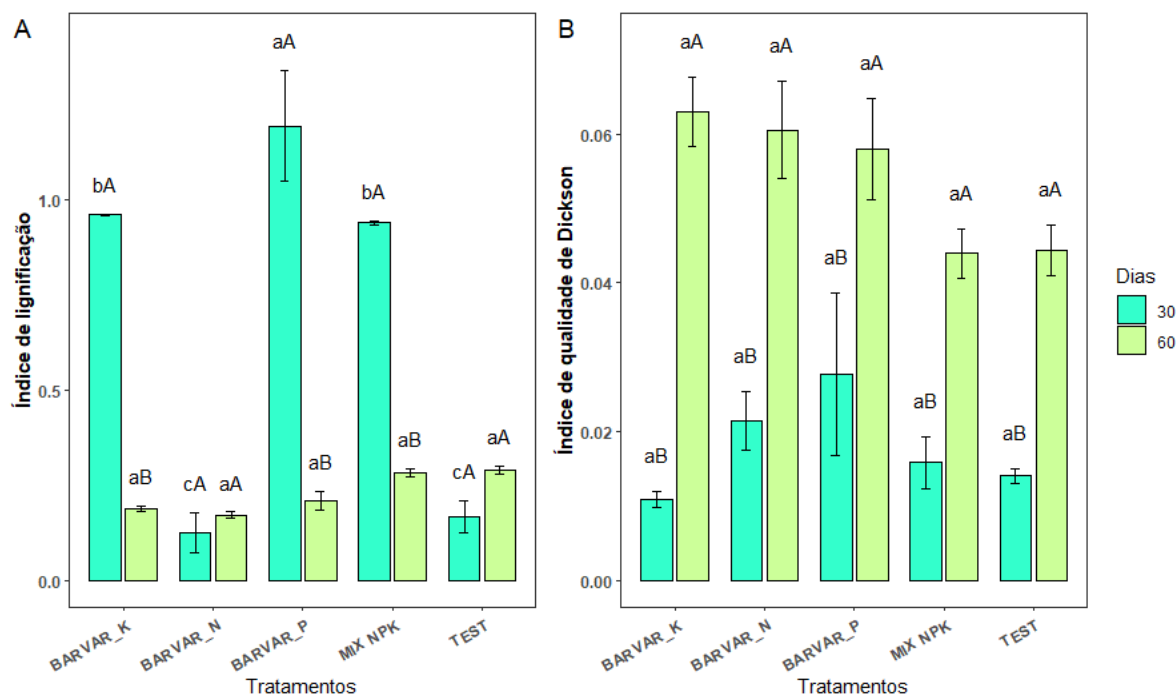
0,29 (controle) a $3,92 \pm 1,01$ (BARVAR+K), indicando diferentes estratégias iniciais de alocação de biomassa. Aos 60 dias, observou-se aumento geral dessa relação, com valores entre $2,00 \pm 0,34$ (BARVAR+N) e $2,85 \pm 0,48$ (MIX NPK e controle), resultando em incremento médio de 10,83%. Os tratamentos BARVAR+K e BARVAR+N apresentaram relações mais próximas do equilíbrio, associadas aos maiores valores de massa seca total observados anteriormente, enquanto MIX NPK e controle exibiram maior desproporção em favor da parte aérea, sem correspondente aumento em biomassa total. Esses resultados indicam que uma alocação mais equilibrada entre parte aérea e sistema radicular esteve associada a maior eficiência de crescimento e melhor desempenho biométrico das mudas (Toca *et al.*, 2022; Raimam *et al.*, 2024).

De acordo com Toca *et al.* (2022), a qualidade de mudas florestais está diretamente associada ao equilíbrio entre crescimento aéreo e radicular, uma vez que a alocação proporcional de biomassa favorece a exploração do substrato e o desempenho pós-plantio. Nesse sentido, os padrões observados nos tratamentos BARVAR+K e BARVAR+N indicam uma estratégia morfofuncional mais eficiente, com integração entre altura, espessamento do coleto e desenvolvimento radicular. Segundo Raimam *et al.* (2024), microrganismos promotores de crescimento tendem a modular essa alocação de assimilados, resultando em mudas de maior qualidade. De forma complementar, Guimarães, Silva e Ferreira (2024) e Silva *et al.* (2025) destacam que valores equilibrados das relações HT/DC e MSPA/MSR são indicativos de crescimento harmonioso, reduzindo riscos de estiolamento e aumentando a probabilidade de estabelecimento das mudas em campo.

5.3.3 Parâmetros fisiológicos

Foi observada interação significativa entre os fatores biofertilizante e tempo para o índice de lignificação (IL) e o índice de qualidade de Dickson (IQD) ($p < 0,05$), indicando que a dinâmica fisiológica das mudas ao longo do período experimental foi dependente do biofertilizante aplicado (Figura 9). Esses índices sintetizam aspectos estruturais e funcionais do crescimento, permitindo avaliar tanto o grau de diferenciação tecidual quanto a robustez e o equilíbrio morfofisiológico das mudas.

Figura 9 - Índice de lignificação e índice de qualidade de Dickson (IQD) de mudas de *E. urophylla* submetidas a diferentes tratamentos e avaliadas aos 30 e 60 dias após o transplântio



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Em que: (A) Índice de lignificação; (B) índice de qualidade de Dickson. Letras minúsculas indicam diferença significativa entre tratamentos dentro do mesmo tempo, e letras maiúsculas indicam diferença significativa entre tempos para o mesmo tratamento (teste de Tukey, $p < 0,05$).

O índice de lignificação (IL) apresentou diferenças significativas entre os tratamentos aos 30 dias, valores elevados aos 30 dias, com maior valor observado em BARVAR+P (1,19), seguido por BARVAR+K (0,96) e MIX NPK (0,94), enquanto BARVAR+N (0,12) e o controle (0,17) apresentaram os menores valores (Figura 9A). Aos 60 dias, observou-se redução significativa do IL na maioria dos tratamentos, com destaque para BARVAR+K, que apresentou queda de 0,95 para 0,42, seguido por BARVAR+N (0,96 para 0,59) e MIX NPK (0,94 para 0,61). Em contraste, BARVAR+P manteve valores elevados e estáveis (0,96 para 0,93), enquanto o controle apresentou redução moderada (0,86 para 0,66).

De acordo com Silva *et al.* (2025), valores de IL superiores a 0,50 indicam mudas de alta qualidade, enquanto valores entre 0,35 e 0,49 caracterizam condição intermediária, associada a maior flexibilidade fisiológica. Assim, a redução do IL ao longo do tempo observada em parte dos tratamentos indica uma transição funcional de tecidos excessivamente rígidos para um estado mais equilibrado entre resistência estrutural e crescimento ativo, condição considerada favorável ao desempenho das mudas após o transplântio.

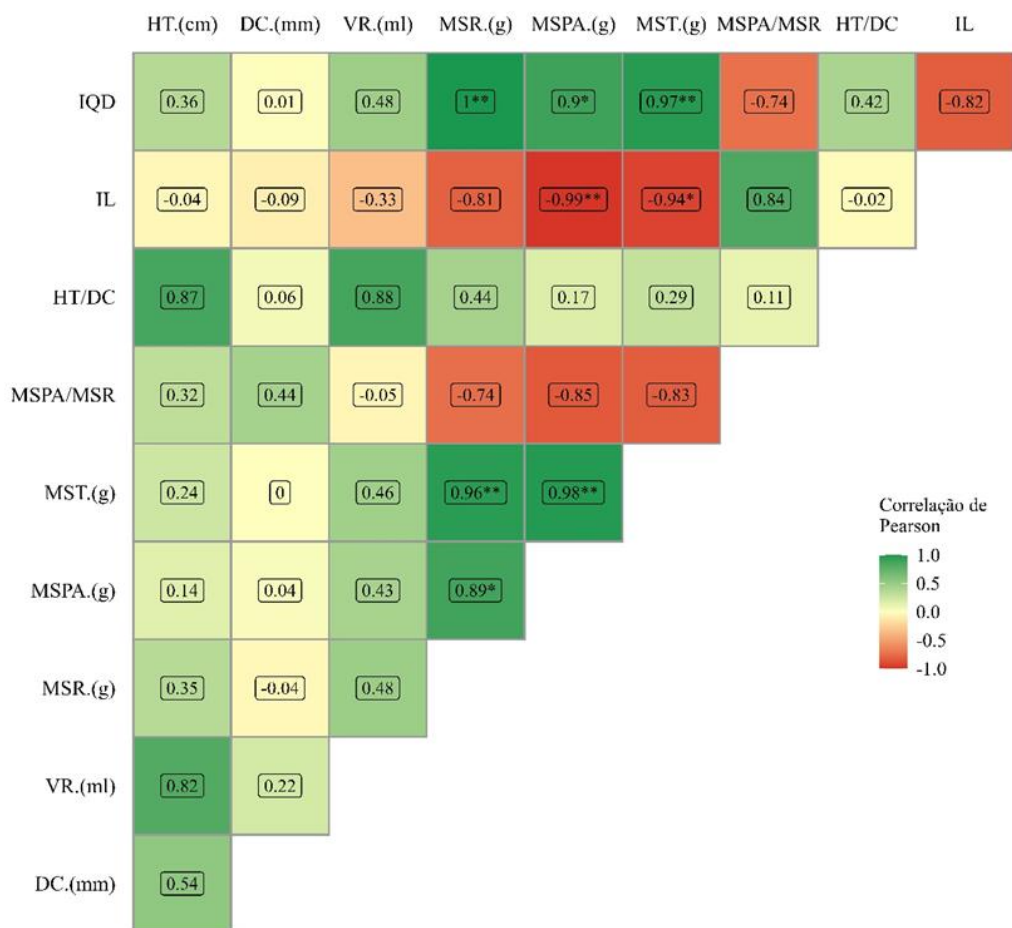
O índice de qualidade de Dickson (IQD) apresentou valores baixos e semelhantes entre os tratamentos aos 30 dias, variando entre 0,006 e 0,013, refletindo o estágio inicial de desenvolvimento das mudas (Figura 9B). Aos 60 dias, verificou-se incremento expressivo do IQD, com destaque para BARVAR+K (0,11) e BARVAR+N (0,09), enquanto MIX NPK e controle apresentaram valores intermediários ($\approx 0,04$) e BARVAR+P manteve valores reduzidos ($\approx 0,01$). Embora os valores de IQD permaneçam abaixo do limite considerado ideal para o transplântio em campo, esses resultados indicam que os tratamentos BARVAR+K e BARVAR+N promoveram melhor equilíbrio entre parte aérea e sistema radicular, sugerindo maior potencial de qualidade das mudas (Raimam *et al.*, 2024).

Embora os valores de IQD permaneçam abaixo do limite clássico considerado ideal para o transplântio em campo ($\approx 0,20$), segundo Silva *et al.* (2025), esse índice é altamente dependente do tempo de viveiro e tende a se expressar plenamente apenas em estágios mais avançados de desenvolvimento, quando há maior acúmulo de biomassa total. Dessa forma, os incrementos observados aos 60 dias, especialmente nos tratamentos BARVAR+K e BARVAR+N, indicam tendência de melhor equilíbrio morfofisiológico, sugerindo maior potencial de qualidade das mudas, ainda que o período experimental represente uma fase precoce (Silva *et al.*, 2025).

5.3.4 Correlação de *Pearson*

A análise de correlação de Pearson mostrou relações estruturais claras entre as variáveis biométricas, fisiológicas e os índices de qualidade das mudas, permitindo compreender os principais fatores associados ao acúmulo de biomassa e à qualidade morfofisiológica. De modo geral, as variáveis relacionadas à biomassa apresentaram as correlações mais fortes e significativas, enquanto as variáveis morfológicas isoladas (altura e diâmetro do coleto) apresentaram correlações fracas ou não significativas com os índices de qualidade (Figura 10).

Figura 10 - Matriz de correlação de Pearson entre variáveis morfológicas, biométricas e fisiológicas indicadoras do crescimento e da qualidade de mudas de *E. urophylla*



*p < 0.05; **p < 0.01

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Em que: Os valores indicam o coeficiente de correlação, e as cores representam a força e a direção da relação (verde: positiva, vermelho: negativa). Asteriscos indicam significância estatística (*p<0.05; **p<0.01).

A massa seca total (MST) apresentou correlações positivas, fortes e altamente significativas com a massa seca da parte aérea (MSPA) ($r = 0,98$; $p < 0,01$) e com a massa seca de raiz (MSR) ($r = 0,96$; $p < 0,01$), confirmando que o acúmulo de biomassa total esteve diretamente associado ao desenvolvimento equilibrado dos compartimentos aéreo e radicular. De forma semelhante, a MSPA correlacionou-se fortemente com a MSR ($r = 0,89$; $p < 0,05$), indicando crescimento integrado entre parte aérea e sistema radicular. Esses resultados reforçam que a produção de biomassa total foi determinada principalmente pela eficiência de alocação de assimilados, e não por variáveis morfológicas isoladas.

O índice de qualidade de Dickson (IQD) apresentou correlações positivas e altamente significativas com MSR ($r = 0,99$; $p < 0,01$), MST ($r = 0,97$; $p < 0,01$) e MSPA ($r = 0,90$; $p < 0,01$).

0,05), confirmando sua eficiência como indicador integrativo da qualidade das mudas. Em contraste, o IQD não apresentou correlação significativa com altura, diâmetro do coleto ou volume de raiz, indicando que a qualidade fisiológica das mudas esteve mais fortemente relacionada ao acúmulo e à distribuição de biomassa do que às dimensões morfológicas individuais.

O índice de lignificação (IL) apresentou correlações negativas significativas com MSPA ($r = -0,99$; $p < 0,01$) e MST ($r = -0,94$; $p < 0,05$), além de correlação negativa elevada com o IQD ($r = -0,82$, embora não significativa ao nível de 5%). Esses resultados indicam que maiores níveis de lignificação estiveram associados à redução do acúmulo de biomassa e da qualidade das mudas, sugerindo que a manutenção de valores intermediários de IL favorece o crescimento ativo e o desenvolvimento fisiológico equilibrado. Adicionalmente, a relação MSPA/MSR apresentou correlações negativas com MSR ($r = -0,74$), MSPA ($r = -0,85$) e MST ($r = -0,83$), indicando que mudas com maior biomassa total tendem a apresentar alocação mais equilibrada entre parte aérea e sistema radicular.

A relação altura/diâmetro do coleto (HT/DC) apresentou correlação forte com a altura da planta ($r = 0,87$) e com o volume de raiz ($r = 0,88$), porém não apresentou correlação significativa com o diâmetro do coleto, o IQD ou o IL. Esse padrão indica que a relação HT/DC refletiu predominantemente o alongamento da planta, sem representar, isoladamente, um indicador robusto de qualidade fisiológica ou estrutural das mudas.

A matriz de correlação mostrou que a qualidade das mudas esteve diretamente associada ao acúmulo e à distribuição de biomassa, e não às dimensões morfológicas isoladas. As correlações fortes entre MST, MSPA e MSR, bem como entre essas variáveis e o IQD, confirmam que mudas com maior biomassa total apresentaram crescimento mais equilibrado entre parte aérea e sistema radicular, uma vez que o índice de qualidade de Dickson integra simultaneamente parâmetros de biomassa e relações morfológicas (Dickson; Leaf; Hosner, 1960). Em contraste, altura, diâmetro do coleto e volume de raiz não se correlacionaram de forma significativa com o IQD, indicando que esses parâmetros, quando avaliados isoladamente, não são bons preditores da qualidade morfofisiológica das mudas, conforme discutido para espécies florestais em viveiro (Guimarães; Silva; Ferreira, 2024; Silva *et al.*, 2025).

O índice de lignificação apresentou correlações negativas com MSPA, MST e IQD, sugerindo que valores elevados de lignificação estiveram associados à redução do crescimento ativo. Esse padrão indica que níveis intermediários de IL favorecem um melhor equilíbrio entre resistência estrutural e expansão celular, condição considerada desejável para mudas florestais

em fase de crescimento vegetativo (Dionisio *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2025). De forma complementar, as correlações negativas da relação MSPA/MSR com as variáveis de biomassa mostram que mudas mais vigorosas tendem a apresentar alocação proporcional entre parte aérea e raízes, reforçando que o desempenho das mudas está ligado à eficiência de crescimento e não ao alongamento excessivo, como descrito por Reyes *et al.* (2014) e sintetizado por Toca *et al.* (2022).

5.4 CONCLUSÃO

A inoculação com biofertilizantes microbianos favoreceu o desenvolvimento inicial de mudas de *E. urophylla*. Os tratamentos BARVAR+K, BARVAR+N e BARVAR+P proporcionaram os maiores volumes radiculares aos 60 dias, enquanto BARVAR+P apresentou os maiores valores de massa seca total. Para MSPA, MSR e IQD, embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, BARVAR+K e BARVAR+N apresentaram as maiores médias ao final do período experimental.

Os biofertilizantes microbianos constituem alternativas promissoras para a produção de mudas de *E. urophylla*, com destaque para BARVAR+K devido ao seu desempenho consistente nas variáveis avaliadas. Contudo, os valores de IQD observados aos 60 dias ainda indicam a necessidade de maior tempo de permanência das mudas em viveiro antes do transplântio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, G. T. O. S.; PICCININ, V. S.; AZEVEDO, G. B.; SILVA, J. V. S.; BARBOSA, G. O.; RIBEIRO, L. S. Qualidade de mudas de *Corymbia citriodora* em diferentes substratos e doses de *Bacillus subtilis*. **Cadernos de Formação de Base**, v. 1, p. 1–12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55592/CFB.2022.1385986>.
- BASU, A.; PRASAD, P.; DAS, S. N.; KALAM, S.; SAYYED, R. Z.; REDDY, M. S.; ENSHASY, H. E. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: recent developments, constraints, and prospects. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1140, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031140>.
- CHANDRAN, H.; MEENA, M.; SWAPNIL, P. Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture. **Sustainability**, v. 13, n. 19, p. 10986, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131910986>.
- CRAWLEY, Michael J. **The R Book**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2012.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, Mattawa, v. 36, n. 1, p. 10–13, 1960. DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>.

DIONISIO, L. F. S.; SCHWARTZ, G.; SÁ DE ALMEIDA, M. J.; ROCHA, T. S.; CORVERA, R. Effects of pruning and recipient volume on seedlings' quality of *Bertholletia excelsa* Bonpl. (Lecythidaceae). **European Academic Research**, v. 9, n. 2, p. 1198-1212, 2021.

EKOMONO, C. G. M.; LOUBASSOU, C. B. S. V.; MBAMA, M. P.; PANZOU, G. J. L.; VIGNERON, P. Adaptability and interspecific variability in growth and leaf traits of eucalypt. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v.14, n.6, p.560–568, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor3660-014>.

GUIMARÃES, Z. T. M.; SILVA, D. C.; FERREIRA, M. J. Seedling quality and short-term field performance of three Amazonian forest species as affected by site conditions. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 17, n. 2, p. 80–89, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor4317-016>

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2025**. Brasília, DF: Ibá, 2025. 102 p. Disponível em: < https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf >. Acesso em: 2 jun. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados meteorológicos da estação automática de Gurupi (A019)**. Brasília, DF: INMET, 2026. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A019>. Acesso em: 2 jun. 2026.

JARDIM, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; HAMADA, M. O. S.; OLIVEIRA, I. A. Efeito do Osmocote® no crescimento e nutrição de mudas de *Lecythis lurida* (Lecythidaceae). **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 23, n. 4, p. 565–574, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811712342024565>.

LAN, Y.; LIAO, L.; YAO, X.; YE, S. Synergistic effects of nitrogen and plant growth-promoting rhizobacteria inoculation on the growth, physiological traits and nutrient absorption of intercropped *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia odorifera*. **Trees**, Berlin, v. 37, p. 319–330, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02350-9>.

LEE, J.-H.; KU, H.-H. Optimizing nitrogen use efficiency and reducing nutrient losses in maize using controlled-release coated fertilizers. **Agrochemicals**, v. 4, n. 3, p. 10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agrochemicals4030010>.

MOREIRA, G. G.; HAKAMADA, R.; SILVA, R. M. L.; LEMOS, C. C. Z.; FLORENTINO, A. L.; GONÇALVES, J. L. M. Seedling morphological characteristics on survival, uniformity, and growth during a full short rotation in *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* plantation. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1756, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14091756>.

NWIGWE, C.; FOSSEY, A.; DE SMIDT, O. Effects of plant growth promoting rhizospheric bacteria (PGPR) on survival, growth and rooting architecture of *Eucalyptus* hybrid clones. **Forests**, v. 14, n. 9, e1848, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14091848>.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>.

RAIMAM, M. P.; CASTRO, G. L. S.; RODRIGUES, G. R.; MORAES, A. J. G.; SILVA, G. B. Inoculation of *Bacillus* sp. improves root architecture, gas exchange and efficiency of nutrient use in *Corymbia* seedlings. **Scientia Horticulturae**, v. 338, p. 113756, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113756>.

REYES, S., J. T.; MUÑOZ FLORES, H. J.; PÉREZ D., C. M. Á.; RUEDA SÁNCHEZ, A.; HERNÁNDEZ RAMOS, J. Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero “Morelia”, estado de Michoacán. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, v. 5, n. 26, p. 103-110, 2014.

RIBEIRO, A. S. N.; CHAGAS, L. F. B.; NÓBREGA, G. S.; SILVA, D. B.; ALVES, M. V. G.; ROCHA, A. M.; MARTINS, A. L. L.; CHAGAS JUNIOR, A. F. Microorganisms promoting plant growth in *Eucalyptus urograndis*. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 2, p. 1–21, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv23n2-136>.

ROSSIELLO, R. O. P.; ARAÚJO, A. P.; MANZATTO, C. V.; FERNANDES, M. S. Comparação dos métodos fotoelétrico e da interseção na determinação da área, comprimento e raio médio radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 5, p. 633-638, mai. 1995.

SEPLAN-TO – Secretaria do Planejamento e Orçamento do Estado do Tocantins. **Base Temática do Estado do Tocantins**. Geodados vetoriais sobre aspectos físico-bióticos, clima, cobertura e uso do solo. Palmas: SEPLAN-TO, 2021. Disponível em: <https://geoportal.to.gov.br/gvsigonline/>. Acesso em: mai. 2025.

SILVA, P. H. M.; ARAUJO, M. J.; LEE, D. J.; BUSH, D.; BARONI, G. R.; PAULA, R. C. Adaptability and stability of novel eucalypt species and provenances across environments in Brazil at two assessment times. **New Forests**, v.53, p.779–796, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09886-7>.

SILVA, T. R.; MILHOMEM, C. A.; SILVA, D. C. V.; DIAS, F. F.; SILVA, C. M.; CABRAL, V. B.; BARDALES-LOZANO, R. M.; SCHWARTZ, G.; DIONISIO, L. F. S. Seedling quality of *Cordia trichotoma* under different container volumes and fertilizers. **Brazilian Journal of Biology**, v. 85, p. 1–9, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.288394>

SOUSA, F. G.; MIELKE, K. C.; CALDEIRA, D. R. M. Genetic diversity and inoculation of plant-growth promoting diazotrophic bacteria for production of *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Australian Journal of Crop Science**, v. 16, n. 1, p. 35–44, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3316/informit.643092702441833>.

SOUSA, F. G.; MIELKE, K. C.; CALDEIRA, D. R. M.; BALDANI, V. L. D.; BALDANI, J. I.; SILVA, R. F. Genetic diversity and inoculation of plant-growth promoting diazotrophic bacteria for production of *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Australian Journal of Crop Science**, v.16, n.1, p.35-44, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.01.p2953>.

TIAN, J.; GE, F.; ZHANG, D.; DENG, S.; LIU, X. Roles of phosphate solubilizing microorganisms from managing soil phosphorus deficiency to mediating biogeochemical P cycle. **Biology**, v. 10, n. 2, p. 158, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology10020158>.

TOCA, A.; MOLER, E.; NELSON, A.; JACOBS, D. F. Environmental conditions in the nursery regulate root system development and architecture of forest tree seedlings: a

systematic review. **New Forests**, Berlin, v. 53, p. 1113–1143, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09944-8>.

WANG, T.; DAI, Q.; FU, Y.; WEI, P. Effect of continuous planting on tree growth traits and growth stress in plantation forests of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. **Sustainability**, v. 15, n. 12, p. 9624, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15129624>.

YIN, J.; LI, G.; LU, Z. Early–late correlations of growth traits of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake clones over a rotation. **Plants**, v. 14, n. 24, p. 3725, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14243725>.

ZHANG, Z.; HE, P.; HAO, X.; LI, L.-J. Long-term mineral combined with organic fertilizer supports crop production by increasing microbial community complexity. **Applied Soil Ecology**, v. 188, p. 104930, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104930>.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que a aplicação de biofertilizantes microbianos é uma estratégia eficiente e sustentável para aprimorar a produção de mudas de *C. citriodora* e *E. urophylla* em viveiro. A inoculação com microrganismos específicos, especialmente BARVAR+K e BARVAR+N, induziu ganhos consistentes no desenvolvimento radicular, no acúmulo de biomassa e nos índices integrativos de qualidade das mudas, resultando em crescimento mais equilibrado do ponto de vista morfológico e fisiológico.

Em contraste, MIX NPK e o controle apresentaram menor eficiência no período avaliado, o que indica que inoculantes específicos podem ser mais eficazes nas fases iniciais de desenvolvimento. Embora os avanços observados aos 60 dias mostrem o potencial dos biofertilizantes como alternativa à adubação mineral convencional, os resultados também indicam a necessidade de períodos mais longos de cultivo para a plena expressão da qualidade das mudas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALOO, B. N.; TRIPATHI, V.; MAKUMBA, B. A.; MBEGA, E. R. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: the past, present, and future. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1002448, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1002448>.
- APARECIDO, L. E. O.; TORSONI, G. B.; LIMA, R. F.; ROLIM, G. S.; MESQUITA, D. Z. Redefining *Eucalyptus* cultivation in South America: adaptive strategies under future climate scenarios. **New Forests**, v. 56, p. 36, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-025-10106-9>.
- BASU, A.; PRASAD, P.; DAS, S. N.; KALAM, S.; SAYYED, R. Z.; REDDY, M. S.; EL ENSHASY, H. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Green Bioinoculants: Recent Developments, Constraints, and Prospects. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1140, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031140>.
- BERNARDO, M. K. F.; SILVA, J. N.; PÁDUA, G. V. G.; SILVA, E. L. F.; SILVA, M. J.; RODRIGUES, C. M.; SALES SILVA, J. H. C.; ALMEIDA, L. G. A.; GOMES, C. L. S.; FARIAS, G. E.; SILVA, M. C. L.; RODRIGUES, M. H. B. S.; SOUZA, A. G.; ARAÚJO, L. D.; SMIDERLE, O. J.; ALVES, E. U. Morphophysiological characterization of *Hymenaea martiana* Hayne seeds and seedlings via manual and digital methods. **Australian Journal of Crop Science**, v. 19, n. 9, p. 903–909, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.25.19.09.p06>.
- CARVALHO, E. V.; COELHO, M. C. B.; SOUZA JÚNIOR, M. R.; GIONGO, M.; SANTOS, M. M.; GANASSOLI NETO, E. Evolução do setor florestal no Tocantins. **Revista de Política Agrícola**, ano 28, n. 1, p. 45-54, 2019.

CHANDRAN, H.; MEENA, M.; SWAPNIL, P. Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture. **Sustainability**, v. 13, n. 19, p. 10986, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131910986>.

CHAUVET, X. D. M.; FRANÇA, L. C. J.; MUCIDA, D. P.; CORDEIRO, S. A.; GORGENS, E. B. Quatro décadas do setor florestal em Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 18, n. 2, p. 1308–1333, 2025.

COELHO, M. C. B.; SOUSA, M. V. R.; RODRIGUES, W. M.; MENEZES, M. P.; MENDONÇA, L. F. T.; BARILLI, J.; LOPES, V. C.; GIONGO, M. Modelos de afilamento e sortimento de madeira em povoamento florestal de *Corymbia citriodora*. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 9, p. 14968–14996, 2023. DOI: <https://doi.org/10.56083/RCV3N9-081>.

COSTELLA, C.; ARAUJO, M. M.; AIMI, S. C.; BERGHETTI, A. L. P.; GRIEBELER, A. M.; LIMA, M. S.; EZEQUIEL, A.; SANTOS, O. P.; VALENTE, B. M. R. T. Mini-tunnel and season influence in clonal garden on the production of clonal seedlings for two subtropical clones: *Eucalyptus saligna* and *Corymbia torelliana* × *Corymbia citriodora*. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 18, n. 3, p. 154–162, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor4460-018>.

CUNHA, F. L.; NIERI, E. M.; SANTOS, J. A.; ALMEIDA, R. S.; MELO, L. A.; VENTURIN, N. Uso dos adubos de liberação lenta no setor florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 41, p. e201902063, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4336/2021.pfb.41e201902063>.

DELATORRE, F. M.; RAMOS, R. D.; CUPERTINO, G. F. M.; SILVA, Á. M.; PEREIRA, A. K. S.; AMORIM, G. A.; DIAS, N. G. F.; CRUZ, J. T. S.; LINHARES, L. K. G.; SANTOS, R. C.; DIAS JÚNIOR, A. F. Environmental and socioeconomic contributions of the forestry sector to Brazil. **Cadernos de Pesquisa**, v. 22, n. 7, 2025. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n7-310>.

EKOMONO, C. G. M.; LOUBASSOU, C. B. S. V.; MBAMA, M. P.; PANZOU, G. J. L.; VIGNERON, P. Adaptability and interspecific variability in growth and leaf traits of eucalypt. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v.14, n.6, p.560–568, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor3660-014>.

FAO – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA. **The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems**. Roma: FAO, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc7724en>. Acesso em: 8 mai. 2025.

FERREIRA, M. K. F.; SILVA, J. N.; PÁDUA, G. V. G.; SILVA, E. L. F.; RODRIGUES, M. H. B. S. et al. Morphophysiological characterization of *Hymenaea martiana* seeds and seedlings via manual and digital methods. **Australian Journal of Crop Science**, v. 19, n. 9, p. 903–909, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00326-0>.

FERREIRA, N. C. F.; GATTO, A.; RAMOS, M. L. G. Co-Inoculation of *Trichoderma harzianum* and *Bradyrhizobium* Species Augment the Growth of *Schizolobium parahyba* var. *parahyba* (Vell.) Blake Seedlings. **Microorganisms**, v. 13, n. 3, p. 630, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms13030630>.

GALLEGOS-CEDILLO, V. M.; DIÁNEZ, F.; NÁJERA, C.; SANTOS, M. Plant Agronomic Features Can Predict Quality and Field Performance: A Bibliometric Analysis. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2305, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11112305>.

GUIMARÃES, Z. T. M.; SILVA, D. C.; FERREIRA, M. J. Seedling quality and short-term field performance of three Amazonian forest species as affected by site conditions. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 17, n. 2, p. 80–89, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor4317-016>

HEALEY, A. L.; LUPOI, J. S.; LEE, D. J.; SYKES, R. W.; GUENTHER, J. M.; TRAN, K.; DECKER, S. R.; SINGH, S.; SIMMONS, B. A.; HENRY, R. J. Effect of aging on lignin content, composition and enzymatic saccharification in *Corymbia* hybrids and parental taxa between years 9 and 12. **Biomass and Bioenergy**, v. 93, p. 50–59, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.016>.

HEALEY, A. L.; SHEPHERD, M.; KING, G. J.; BUTLER, J. B.; FREEMAN, J. S.; LEE, D. J.; POTTS, B. M.; SILVA-JUNIOR, O. B.; BATEN, A.; JENKINS, J.; et al. Pests, diseases, and aridity have shaped the genome of *Corymbia citriodora*. **Communications Biology**, v. 4, p. 537, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02001-8>.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual 2024. Brasília, DF: Ibá, 2024. 120 p. Disponível em: <<https://iba.org/relatorio2024.pdf>>. Acesso em: 8 mai. 2025.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual 2025**. São Paulo: IBÁ, 2025. Disponível em: [IBÁ – Relatório Anual 2025](#). Acesso em: 8 mai. 2026.

JARDIM, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; HAMADA, M. O. S.; OLIVEIRA, I. A. Efeito do Osmocote® no crescimento e nutrição de mudas de *Lecythis lurida* (Lecythidaceae). **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 23, n. 4, p. 565–574, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811712342024565>.

KULMANN, M. S. S.; ARRUDA, W. S.; VITTO, B. B.; SOUZA, R. O. S.; BERGHETTI, A. L. P.; TAROUÇO, C. P.; ARAUJO, M. M.; NICOLOSO, F. T.; SCHUMACHER, M. V.; BRUNETTO, G. Morphological and physiological parameters influence the use efficiency of nitrogen and phosphorus by *Eucalyptus* seedlings. **New Forests**, v. 53, p. 431–448, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09864-z>.

LEE, J.-H.; KU, H.-H. Optimizing nitrogen use efficiency and reducing nutrient losses in maize using controlled-release coated fertilizers. **Agrochemicals**, v. 4, n. 3, p. 10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agrochemicals4030010>.

LIMA, M. S.; ARAUJO, M. M.; BERGHETTI, Á. L. P.; AIMI, S. C.; COSTELLA, C.; GRIEBELER, A. M.; SOMAVILLA, L. M.; SANTOS, O. P.; VALENTE, B. M. R. T. Mini-cutting technique application in *Corymbia* and *Eucalyptus*: effects of mini-tunnel use across seasons of the year. **New Forests**, v. 53, p. 161–179, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09851-4>.

MASSUQUE, J.; LIMA, M. D. R.; SILVA, P. H. M.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Potential of charcoal from non-commercial *Corymbia* and *Eucalyptus* wood for use in the steel industry. **Renewable Energy**, v. 211, p. 179–187, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.061>.

MATARUGA, M.; CVJETKOVIĆ, B.; DE CUYPER, B.; ANEVA, I.; ZHELEV, P.; CUDLÍN, P.; METSLAID, M.; KANKAANHUHTA, V.; COLLET, C.; ANNIGHÖFER, P.; MATHES, T.; MARIANTHI, T.; PAITARIDOU, D.; JÓNSDÓTTIR, R. J.; MONTEVERDI, M. C.; DE DATO, G.; MARIOTTI, B.; KOLEVSKA, D. D.; LAZAREVIĆ, J.; FLØISTAD, I. S.; VILLAR-SALVADOR, P. Monitoring and control of forest seedling quality in Europe. **Forest Ecology and Management**, v. 546, p. 121308, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121308>.

MELO, A. B.; SILVA, P. H. M.; ARAUJO, S. L.; SILVA, J. G. M.; FERRAZ, A. V.; ROCHA, S. M. G.; ALMEIDA, M. N. F.; ARAÚJO, M.; GODINHO, T.; CASTOR NETO, T. C.; et al. Productivity and wood quality traits of *Corymbia* and *Eucalyptus* species in two soil water deficit sites. **Industrial Crops and Products**, v. 219, p. 119141, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119141>.

MOREIRA, G. G.; HAKAMADA, R.; SILVA, R. M. L.; LEMOS, C. C. Z.; FLORENTINO, A. L.; GONÇALVES, J. L. M. Seedling Morphological Characteristics on Survival, Uniformity, and Growth during a Full Short Rotation in *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* Plantation. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1756, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14091756>.

NOGUEIRA, M. C. J. A.; VASCONCELOS, J. S.; ARAUJO, V. A.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Characterization of *Corymbia citriodora* Wood for Construction. **Holos**, v. 37, p. e10747, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2021.10747>.

NOSHEEN, S.; AJMAL, I.; SONG, Y. Microbial biofertilizers and their impact on plant growth, nutrient uptake, and stress resistance. **Agronomy**, v. 11, n. 6, p. 1–19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11061140>.

OLIVEIRA, A. M.; ABREU, C. M.; GRAZZIOTTI, P. H.; ANDRADE, G. F. P.; GOMES, J. V.; AVELINO, N. R.; MENEZES, J. F. S.; BARROSO, G. M.; SANTOS, J. B.; COSTA, M. R. Production of seedlings of *Corymbia citriodora* inoculated with endophytic bacteria. **Forests**, v. 15, n. 6, p. 905, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15060905>.

OLIVEIRA, A. M.; COSTA, M. R.; GRAZZIOTTI, P. H.; ABREU, C. M.; AVELINO, N. R.; REIS, L. A. C.; ANDRADE, G. F. P.; MENEZES, J. F. S. Initial development of *Corymbia citriodora* × *Corymbia torelliana* plants inoculated with endophytic bacteria under indole butyric acid concentrations. **New Forests**, v. 55, p. 1669–1686, 2024b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-024-09995-5>.

OLIVEIRA, G. S.; TIMOFEICZYK JUNIOR, R.; LOPER, A. A.; STEINER JUNIOR, P. J.; ALVES, R. R. Participation of silviculture products in the gross domestic product of the Brazilian forest-based sector from 2000 to 2019. **Floresta**, v. 53, n. 4, p. 444–451, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v53i4.81620>.

PAZ, L. R. S.; DIAS, R. R.; UHLMANN, A.; COLLICCHIO, E. Análise ambiental da expansão de florestas plantadas no extremo norte do Tocantins. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 2, p. 44–54, 2020. DOI: https://doi.org/10.11137/2020_2_44_54.

PERRY, M. J.; WANGCHUK, P. The Ethnopharmacology, Phytochemistry and Bioactivities of the *Corymbia* Genus (Myrtaceae). **Plants**, v. 12, n. 21, p. 3686, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12213686>.

RAIMAM, M. P.; CASTRO, G. L. S.; RODRIGUES, G. R.; MORAES, A. J. G.; SILVA, G. B. Inoculation of *Bacillus* sp. improves root architecture, gas exchange and efficiency of nutrient use in *Corymbia* seedlings. **Scientia Horticulturae**, v. 338, p. 113756, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113756>.

REHMAN, H. U.; KHAN, M. T.; BASIT, F.; WANG, G. Sustainable biofertilizers: mechanisms, applications, and future prospects in agriculture. **Plants**, v. 10, n. 11, p. 1–20, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-83066-3_2.

RIBEIRO, A. S. N.; CHAGAS JUNIOR, A. F.; CHAGAS, L. F. B.; MARTINS, A. L. L.; ALMEIDA, L. B.; NOBREGA, G. S.; SILVA, D. B.; ALVES, M. V. G. Efficiency of *Trichoderma* and *Bacillus subtilis* as growth promoters in eucalyptus *Corymbia citriodora*. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 11, p. 1–15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv21n11-097>

RIBEIRO, A. S. N.; CHAGAS JUNIOR, A. F.; CHAGAS, L. F. B.; MARTINS, A. L. L.; ALMEIDA, L. B.; NOBREGA, G. S.; SILVA, D. B.; ALVES, M. V. G. Efficiency of *Trichoderma* and *Bacillus subtilis* as growth promoters in eucalyptus *Corymbia citriodora*. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 11, p. 20380–20397, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv21n11-097>.

RIBEIRO, A. S. N.; CHAGAS, L. F. B.; NOBREGA, G. S.; SILVA, D. B.; ALVES, M. V. G. Microorganisms promoting plant growth in *Eucalyptus urograndis*. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v.23, n.2, p.01-21, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv23n2-136>.

ROCHA, J.; NUNES, P. J.; PINTO, A.; FENINA, L.; AFONSO, A. L.; SEIXAS, A. R.; CRUZ, R.; PEREIRA, R. F. P.; FERNANDES, M.; CASAL, S.; DE ZEA BERMUDEZ, V.; CRESPI, A. L. Ecological adaptation of Australian Myrtaceae through the leaf waxes analysis: *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus gunnii*, and *Eucalyptus globulus*. **Flora**, v. 310, p. 152435, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152435>.

ROCHA, M. E. L.; RISTAU, A. C. P.; VERA CRUZ, M. S. F.; OLIVEIRA NETO, C. F.; MALAVASI, M. M.; MALAVASI, U. C. Growth dynamics of container seedlings of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* and *Hymenaea courbaril* L. **Revista Ceres**, v. 69, n. 4, p. 496–508, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269040006>.

SARMA, N.; GOGOI, R.; LOYING, R.; BEGUM, T.; MUNDA, S.; PANDEY, S. K.; LAL, M. Phytochemical composition and biological activities of essential oils extracted from leaves and flower parts of *Corymbia citriodora* (Hook.). **Journal of Environmental Biology**, v. 42, p. 552–562, 2021. DOI: [http://doi.org/10.22438/jeb/42/2\(SI\)/SI-285](http://doi.org/10.22438/jeb/42/2(SI)/SI-285).

SENKOVS, M.; NIKOLAJEVA, V.; MAKARENKOVA, G.; PETRINA, Z. Influence of *Trichoderma asperellum* and *Bacillus subtilis* as biocontrol and plant growth promoting agents on soil microbiota. **Annals of Microbiology**, v. 71, p. 34, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13213-021-01647-0>.

SILVA, C. C. S.; SILVA, M. F. O. Bioeconomia e setor florestal no Brasil: uma análise comparativa entre os anos censitários de 2006 e 2017. **Cadernos de Ciências Sociais Aplicadas**, v. 22, n. 1, p. 1–24, 2024. DOI: <https://doi.org/10.22481/ccsa.v22i1.16925>.

SILVA, P. H. M.; ARAUJO, M. J.; LEE, D. J.; BUSH, D.; BARONI, G. R.; PAULA, R. C. Adaptability and stability of novel eucalypt species and provenances across environments in Brazil at two assessment times. **New Forests**, v.53, p.779–796, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09886-7>.

SILVA, T. R. R.; MILHOMEM, C. A.; SILVA, D. C. V.; DIAS, F. F.; SILVA, C. M.; CABRAL, V. B.; BARDALES-LOZANO, R. M.; SCHWARTZ, G.; DIONISIO, L. F. S. Seedling quality of *Cordia trichotoma* under different container volumes and fertilizers. **Brazilian Journal of Biology**, v. 85, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.288394>.

SOUZA, O. M. M.; OLIVEIRA, B. G.; COLLICCHIO, E.; SILVA JÚNIOR, J. L. C.; SERRA, J. C. V. Aptidão agroclimática do *Eucalyptus urophylla* para a região do Matopiba. **Ciência Florestal**, v. 34, n. 2, e70219, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509870219>.

SOUZA, R. E.; SANTOS JUNIOR, A. J.; ABREU, A. H. M.; SOUZA, N. D.; DIAS JÚNIOR, A. F. Uso de ferramentas de qualidade para avaliar a produção de mudas florestais na fase de viveiro. **Advances in Forestry Science**, v. 8, n. 1, p. 11–23, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v8i1.10765>.

TIAN, J.; GE, F.; ZHANG, D.; DENG, S.; LIU, X. Roles of phosphate solubilizing microorganisms from managing soil phosphorus deficiency to mediating biogeochemical P cycle. **Biology**, v. 10, n. 2, p. 158, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology10020158>.

WANG, H.; LIU, R.; YOU, M. P.; BARBETTI, M. J.; CHEN, Y. L. Pathogen biocontrol using plant growth-promoting bacteria (PGPR): Role of bacterial diversity. **Microorganisms**, v. 9, n. 9, p. 1988, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091988>.

WEI, Z.; HOFFLAND, E.; ZHUANG, M.; HELLEGERS, P.; CUI, Z. Organic inputs to reduce nitrogen export via leaching and runoff: A global meta-analysis. **Environmental Pollution**, v. 291, p. 118176, 15 dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118176>.

YAPA, P. N.; ABHAYAWANSA, T. D.; GUNATHILAKE, T. R.; WIJESINGHE, R. Sustainable seedling production using biochar, compost, and beneficial microbes in tropical forestry. **Forests**, v. 14, n. 2, p. 1–17, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/fl4020245>.

ZHANG, Z.; HE, P.; HAO, X.; LI, L.-J. Long-term mineral combined with organic fertilizer supports crop production by increasing microbial community complexity. **Applied Soil Ecology**, v. 188, p. 104930, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104930>.