

ANDRÉA ALECHANDRE DA ROCHA

**SINERGIA ENTRE BIOCHAR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS
AMAZÔNICOS E ADUBAÇÃO NA PRODUÇÃO DE
MUDAS DE AÇAIZEIRO**

RIO BRANCO - AC

2025

ANDRÉA ALECHANDRE DA ROCHA

**SINERGIA ENTRE BIOCHAR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS
AMAZÔNICOS E ADUBAÇÃO NA PRODUÇÃO DE
MUDAS DE AÇAIZEIRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Produção Vegetal.

Orientadora: Dra. Regina Lúcia F. Ferreira.
Coorientadora: Dra. Aurenny Maria P. Lunz

RIO BRANCO - AC

2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

R672s Rocha, Andréa Alechandre da, 1966 -
Sinergia entre biochar de resíduos agroindustriais amazônicos
e adubação na produção de mudas de açaizeiro / Andréa
Alechandre da Rocha; orientadora: Profa. Dra. Regina Lúcia Felix
Ferreira, coorientadora: Profa. Dra. Aurenny Maria Pereira Lunz. –
2025.

112 f. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Acre, Programa de
Pós-Graduação em Produção Vegetal. Rio Branco, 2025.

Possui referências bibliográficas.

1. Biocarvão. 2. Produção de mudal. 3. Açaí. I. Ferreira, Regina
Lúcia Felix (orientadora). II. Lunz, Aurenny Maria Pereira
(coorientadora). III. Título.

CDD: 338.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Produção Vegetal
ATA DE DEFESA DE TESE

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DA TESE DE ANDRÉA ALECHANDRE DA ROCHA, DISCENTE DO CURSO DE DOUTORADO EM PRODUÇÃO VEGETAL, REALIZADA NO DIA 16 DE DEZEMBRO DE 2025.

No dia dezesseis de dezembro de 2025, às 8 horas, realizou-se a defesa da tese intitulada **SINERGIA ENTRE BIOCHAR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS AMAZÔNICOS E ADUBAÇÃO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE AÇAIZEIRO**, de autoria da doutoranda Andréa Alechandre da Rocha, do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal. A Comissão examinadora esteve constituída pelos Doutores Regina Lúcia Félix Ferreira (Orientadora - UFAC), Sebastião Elviro de Araújo Neto (Membro - UFAC), Marilene Santos de Lima (Membro - UFAC), Romeu de Carvalho Andrade Neto (Membro - Embrapa/Tabuleiros Costeiros) e Conceição Paula Rufino Bandeira (Membro - Secretaria Municipal de Plácido de Castro, AC). Após a exposição oral, a discente foi arguida pelos examinadores e, às 11 horas e 40 minutos, a sessão foi suspensa e em reunião secreta os examinadores atribuíram o resultado. Reaberta a sessão presencial para anunciar o resultado, a discente foi considerada APROVADA pela Comissão Examinadora. E para constar, foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, vai assinada eletronicamente pelos membros da banca.

Documento assinado digitalmente
 REGINA LUCIA FELIX FERREIRA
Data: 22/12/2025 17:32:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Branco, 16 de dezembro de 2025.

DRA. REGINA LÚCIA FÉLIX FERREIRA
Orientadora (UFAC)

Documento assinado digitalmente
 SEBASTIAO ELVIRO DE ARAUJO NETO
Data: 26/12/2025 23:40:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DR. SEBASTIÃO ELVIRO DE ARAÚJO NETO
Membro (UFAC)

Documento assinado digitalmente
 MARILENE SANTOS DE LIMA
Data: 22/12/2025 22:17:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DRA. MARILENE SANTOS DE LIMA
Membro (UFAC)

Documento assinado digitalmente
 ROMEU DE CARVALHO ANDRADE NETO
Data: 24/12/2025 10:25:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DR. ROMEU DE CARVALHO ANDRADE NETO
Membro (Embrapa Tabuleiros Costeiros)

Documento assinado digitalmente
 CONCEICAO PAULA BANDEIRA RUFINO
Data: 24/12/2025 18:19:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DRA. CONCEIÇÃO PAULA RUFINO BANDEIRA
Membro (Secretaria Municipal de Agricultura de Plácido de Castro, AC)

ANDRÉA ALECHANDRE DA ROCHA
Discente

Documento assinado digitalmente
 ANDREA ALECHANDRE DA ROCHA
Data: 02/01/2026 20:20:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

À minha família,
Ao Romário de Mesquita Pinheiro (*in memoriam*)

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus Trino, Pai, Filho e Espírito Santo, por tão grande amor e generosidade.

À Universidade Federal do Acre por meio do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal pela oportunidade de realização do curso.

À minha família, em particular a Tereza Flor, minha mãe, Roxane Alexandre, minha sobrinha, por todo o amor e incentivo.

Às minhas orientadoras, Profa. Dra. Regina Lúcia Félix Ferreira, à Dra. Aurenny Maria Pereira Lunz pela amizade, ensinamentos e incentivos.

Ao Dr. Romeu de Carvalho Andrade Neto pelo período inicial da minha orientação.

Aos professores e professoras do PPGPV pelos preciosos ensinamentos.

À Jennyfer Tamara de Lima Barbosa, Victor da Silva Barbosa, João Pedro dos Santos Silva Cavalcante, João Pedro Menezes da Silva, Daniel Amarilha, Iricélia Vieira Cardoso, Maria Alcirlândia da Silva Bezerra, Aldenice Lima, Leonardo Hadad de Oliveira e Romário de Mesquita Pinheiro (*in memoriam*) pelo super apoio nas avaliações de campo. Vocês foram fundamentais.

Aos meus colegas de caminhada, em particular, Paula Rufino, Júlio de Souza Marques, Márcia Mendonça, Jardeson Kennedy Moraes de Souza, Joaes Alves da Silva Pereira e Cleyton Silva de Araújo por toda a amizade, apoio e café. Vocês são incríveis!

À Embrapa Acre pelo apoio à implantação e acompanhamento dos experimentos, em particular Fernando Pretti Rimério, Lauro Saraiva Lessa e Rafael de Melo Clemêncio.

Aos meus colegas do Parque Zoobotânico: Cristina Boaventura, Foster Brown, Almecina Balbino, Izailene Saar, Plínio Mitoso, Alexsande Franco e tantos outros pelo incentivo e apoio.

Aos meus irmãos e irmãs em Cristo por toda a intercessão, amor e suporte espiritual. Vocês foram fundamentais!

“Ao SENHOR pertencem a terra e tudo o que nela existe,
o mundo e os que nele habitam.”
Salmos 24.1, A21

RESUMO GERAL

A agricultura amazônica enfrenta desafios crescentes decorrentes das mudanças climáticas e da degradação ambiental, exigindo a adoção de estratégias sustentáveis que valorizem o uso de resíduos agroindustriais na fruticultura regional. Nesse contexto, esta tese teve como objetivo investigar o potencial sinérgico de biochars produzidos a partir de resíduos agroindustriais amazônicos e diferentes sistemas de adubação na produção de mudas de açaizeiro-de-touceira (*Euterpe oleracea* Mart.), cultivar BRS Pai d'Égua. Os experimentos foram conduzidos na Embrapa Acre, em Rio Branco, AC, no período de março a dezembro de 2023. A tese foi estruturada em dois capítulos. No primeiro capítulo, avaliou-se a sinergia entre biochars obtidos de resíduos agroindustriais amazônicos, casca de cupuaçu, casca de amêndoa de castanha-do-brasil e caroço de açaí, e a adubação convencional, por meio da caracterização físico-química dos biochars e da avaliação de seus efeitos sobre variáveis morfológicas e de biomassa das mudas. O biochar de casca de cupuaçu destacou-se em relação aos demais, apresentando maior teor de nutrientes, superior capacidade de retenção de água e propriedades estruturais favoráveis, resultando em incrementos significativos na altura da planta, no diâmetro do coleto, na massa seca das mudas e no Índice de Qualidade de Dickson (IQD), com maior eficiência nas concentrações intermediárias, entre 20% e 30%. Diante desse desempenho, no segundo capítulo, avaliou-se o efeito de concentrações crescentes desse biochar (0% a 50%) associadas a três fontes de adubação, testemunha, fertilizante de liberação controlada (FLC) e adubação convencional, sobre características morfológicas, fisiológicas, o IQD e o incremento mensal em altura e diâmetro do colo das mudas. Os resultados demonstraram que a associação do biochar de casca de cupuaçu com a adubação convencional constitui a estratégia mais eficaz para a produção de mudas de *Euterpe oleracea*, cultivar BRS Pai d'Égua, promovendo maiores ganhos em crescimento, acúmulo de biomassa e qualidade das mudas, com concentrações entre 28% e 30%. Contudo, o uso isolado do biochar mostrou-se insuficiente, evidenciando que sua principal contribuição reside na sinergia com fontes externas de nutrientes.

Palavras-chave: Biocarvão. *Euterpe oleracea*. BRS Pai D'Égua. Fertilizante de liberação controlada (FLC). Viveiro de mudas.

GENERAL ABSTRACT

Amazonian agriculture faces increasing challenges driven by climate change and environmental degradation, requiring the adoption of sustainable strategies that promote the use of agro-industrial residues in regional fruit production. In this context, this doctoral thesis aimed to investigate the synergistic potential of biochars derived from Amazonian agro-industrial residues and different fertilization systems in the production of clump-forming açai palm seedlings (*Euterpe oleracea* Mart.), cultivar BRS Pai d'Égua. The experiments were conducted at Embrapa Acre, in Rio Branco, Acre State, Brazil, from March to December 2023. The thesis was structured into two chapters. In the first chapter, the synergy between biochars produced from Amazonian agro-industrial residues, cupuaçu husk, Brazil nut shell, and açai stone and conventional fertilization was evaluated. The study included the physicochemical characterization of the biochars and the assessment of their effects on morphological traits and biomass accumulation of seedlings of the cultivar BRS Pai d'Égua. Biochar derived from cupuaçu husk stood out due to its higher nutrient content, greater water-holding capacity, and favorable structural properties, resulting in significant increases in plant height, stem diameter, and seedling dry mass. These improvements were reflected in higher Dickson Quality Index (DQI) values, with intermediate biochar concentrations (20–30%) being the most effective. Based on the superior performance of cupuaçu husk biochar, the second chapter evaluated the effects of increasing concentrations of this biochar (0–50%) combined with three fertilization sources, control (no fertilizer), controlled-release fertilizer (CRF), and conventional fertilization on morphological and physiological traits, Dickson Quality Index, and monthly increments in plant height and stem diameter of açai palm seedlings. The results demonstrated that the combination of cupuaçu husk biochar with conventional fertilization represents the most effective strategy to produce *Euterpe oleracea*, cultivar BRS Pai d'Égua seedlings, promoting the greatest gains in growth, biomass accumulation, and seedling quality. Biochar concentrations between 28% and 30% optimized vegetative growth and biomass production under conventional fertilization. However, the isolated use of biochar proved insufficient, indicating that its main contribution lies in its synergistic interaction with external nutrient sources.

Keywords: Biochar. *Euterpe oleracea*. BRS Pai D'Egua. Controlled-release fertilizer (CRF). Seedling nursery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Viveiro de produção de mudas da Embrapa Acre, em Rio Branco-AC, com mudas de açaí-de-touceira transplantadas em tubetes de 900 mL sob sombreamento de 50%, Rio Branco, AC, 2025	43
Figura 2. Resíduos agroindustriais de açaí obtido por pirólise em forno artesanal, utilizado como componente do substrato no experimento, Rio Branco, AC, 2025	43
Figura 3. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochars sobre a altura de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2025.....	52
Figura 4. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochar sobre o diâmetro do colo de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024..	54
Figura 5. Relação altura/diâmetro de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes de biochar. Rio Branco, AC, 2024	55
Figura 6. Relação altura/diâmetro de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de concentrações de biochar. Rio Branco, AC, 2024	56
Figura 7. Número de folhas de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes de biochar. Rio Branco, AC, 2024.....	57
Figura 8. Índice SPAD de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes de biochar. Rio Branco, AC, 2024.....	58
Figura 9. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochar sobre a massa seca da parte aérea de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024	60
Figura 10. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochar sobre a massa seca das raízes de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024	61

Figura 11. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochar sobre a massa seca total de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024.....	62
Figura 12. Relação parte aérea/raiz de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes de biochar. Rio Branco, AC, 2024	64
Figura 13. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochar sobre o Índice de Qualidade de Dickson de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024.....	65
Figura 14. Localização do campo experimental da Embrapa Acre, Rio Branco – AC (Fonte: ZEE – Acre Fase II. Elaborado por Carlos Alberto Campos, 2023)	79
Figura 15. Mudas de açaizeiro (<i>Euterpe oleracea</i> Mart.) da cultivar BRS Pai d'Égua em tubetes de 900 mL durante o período experimental, no viveiro da Embrapa Acre, Rio Branco – AC, 2023	80
Figura 16. Forno artesanal utilizado na pirólise de casca de cupuaçu para a produção de biochar, em Rio Branco – AC, 2023	81
Figura 17. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre a altura de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024.....	86
Figura 18. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre o diâmetro do colo de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024	87
Figura 19. Relação altura/diâmetro de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de tipos de adubação. Rio Branco, AC, 2024	88
Figura 20. Relação altura/diâmetro de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de concentrações de biochar de casca de cupuaçu. Rio Branco, AC, 2024	89

Figura 21. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre o número de folhas de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco – AC, 2024	90
Figura 22. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre o índice SPAD de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024	91
Figura 23. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre a massa seca da parte aérea de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024	93
Figura 24. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre a massa seca das raízes de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024	94
Figura 25. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre a massa seca total de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024	95
Figura 26. Relação parte aérea/raiz de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de tipos de adubação. Rio Branco, AC, 2024	97
Figura 27. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre o índice de qualidade de Dickson de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024	98
Figura 28. Incremento mensal da altura da planta (A) e do diâmetro do colo (B) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua submetidas a concentrações de biochar de casca de cupuaçu e adubação convencional durante o período em viveiro. Rio Branco, AC, 2024.....	100
Figura 29. Incremento mensal da altura da planta (A) e do diâmetro do colo (B) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua submetidas a concentrações de biochar de casca de cupuaçu e adubação durante o período em viveiro. Rio Branco, AC, 2024.....	101

Figura 30. Incremento mensal da altura da planta (A) e do diâmetro do colo (B) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua submetidas a concentrações de biochar de casca de cupuaçu sem adubação durante o período em viveiro. Rio Branco, AC, 2024	102
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise físico-química de substratos com biochar de casca de amêndoa da castanha-do-brasil (CAS), biochar de casca de cupuaçu (CUP) e biochar de caroço de açaí (AÇA) em combinação com substrato comercial Maxfertil. Rio Branco, AC, 2023.....	48
Tabela 2. Resumo da análise de variância para as variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colo (DC), relação altura/diâmetro (RAD), número de folhas (NF) e índice SPAD de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes e concentrações de biochar. Rio Branco, AC, 2024	52
Tabela 3. Resumo da análise de variância para as variáveis massas secas da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST), relação parte aérea/raiz (RPAR) e índice de qualidade de Dickson (IQD) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes e concentrações de biochar. Rio Branco, AC, 2024	59
Tabela 4. Resumo da análise de variância para as variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colo (DC), relação altura/diâmetro (RAD), número de folhas (NF) e índice SPAD de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação. Rio Branco, AC, 2024	84
Tabela 5. Resumo da análise de variância para as variáveis massas secas da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST), relação parte aérea/raiz (RPAR) e índice de qualidade de Dickson (IQD) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação. Rio Branco, AC, 2024.....	92
Tabela 6. Resumo da análise de variância dos incrementos mensais em altura e diâmetro do colo de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua, em função das concentrações de biochar de casca de cupuaçu ao longo dos meses após a repicagem, sob três fontes de adubação. Rio Branco, AC, 2024	99

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 O AÇAIZEIRO	20
2.2 PRODUÇÃO DE MUDAS DE AÇAIZEIRO-DE-TOUCEIRA	20
2.3 BIOCHAR: CONCEITO, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES	21
2.4 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS AMAZÔNICOS PARA PRODUÇÃO DE BIOCHAR	24
2.5 ADUBAÇÃO CONVENCIONAL E DE LIBERAÇÃO CONTROLADA DE MUDAS	25
REFERÊNCIAS	27
3 CAPÍTULO I	36
3.1 INTRODUÇÃO	39
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	42
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
3.3.1 Análise Físico-Química dos Biochars e Implicações para o Crescimento de Mudas	47
3.3.2 Variáveis de Crescimento Vegetativo e Qualidade das Mudas	50
3.3.3 Implicações Práticas e Sustentabilidade	66
3.4 CONCLUSÕES	67
REFERENCIAS	68
4 CAPÍTULO II	74
4.1 INTRODUÇÃO	77
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
4.3.1 Crescimento vegetativo	84
4.3.2 Biomassa e Índice de qualidade de Dickson (IQD)	91
4.3.3 Incremento de crescimento	99
4.4 CONCLUSÕES	105
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	106
REFERENCIAS	109

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Amazônia constitui um território estratégico para a agricultura brasileira, em função de sua expressiva dimensão geográfica e elevada diversidade biológica, bem como dos desafios associados à degradação ambiental, às mudanças no uso da terra e à intensificação da produção agrícola (Barona *et al.*, 2014). A expansão agropecuária, frequentemente associada à perda de cobertura florestal, evidencia o dilema entre a ampliação da produção agrícola e a conservação dos ecossistemas, especialmente na Amazônia (Carvalho *et al.*, 2014).

Diante desse cenário, torna-se imperativa a busca por alternativas sustentáveis capazes de conciliar produtividade, preservação ambiental e resiliência dos sistemas agrícolas, assegurando a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Entre as estratégias mais promissoras destacam-se os sistemas agroflorestais e a produção de mudas de espécies florestais e frutíferas nativas, fundamentais para a restauração ecológica e para o fortalecimento da bioeconomia amazônica (Miccolis *et al.*, 2016; Ottoboni; Andreani Junior, 2025).

Entre as espécies florestais nativas mais utilizadas nos projetos e iniciativas de restauração florestal na Amazônia está o açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) (Rodrigues, 2022), dada sua relevância econômica, social e ambiental. Essa espécie movimenta cadeias produtivas locais e garante a subsistência de milhares de famílias, reforçando a importância de práticas que assegurem mudas de qualidade. A produção de plantas vigorosas não apenas define o sucesso do transplântio, mas também determina o desempenho agrônomo e a longevidade do cultivo em campo.

A fase inicial de desenvolvimento das mudas depende diretamente da qualidade das sementes, dos substratos e do manejo nutricional adotado (Nascimento; Pereira, 2016). Estudos recentes mostram que a utilização de materiais alternativos, como resíduos agroindustriais transformados em insumos, associada ao uso de fertilizantes, melhora significativamente atributos morfológicos das mudas (Araújo *et al.*, 2020; Chhetri *et al.*, 2020). Um insumo que tem se destacado nesse cenário é o biochar, obtido pela pirólise de biomassas em condições de baixa disponibilidade de oxigênio (Novotny *et al.*, 2015; Cardoso Júnior *et al.*, 2022). Esse material apresenta propriedades físicas, químicas e biológicas favoráveis, como o aumento da fertilidade, a melhoria da retenção de água e o estímulo à atividade microbiana no solo. A abundância de resíduos agroindustriais de espécies nativas na

Amazônia oferece condições ideais para a produção de biochar. Tal aproveitamento não só reduz impactos ambientais, mas também agrega valor às cadeias produtivas locais, transformando resíduos em insumos agrícolas estratégicos (Vaz-Júnior, 2020; Maniraj *et al.*, 2023; Bayma *et al.*, 2025).

Diversos trabalhos já demonstraram que o biochar pode melhorar o crescimento inicial das mudas, seja por modificar atributos físicos e químicos do solo, seja por favorecer a interação com microrganismos benéficos da rizosfera (Araújo *et al.*, 2020; Tavares *et al.*, 2021; Siqueira, 2022). No entanto, sua eficácia depende da biomassa utilizada, das condições de pirólise e das características do substrato. Por esse motivo, a investigação de diferentes fontes, concentrações e formas de associação com adubação convencional ou de liberação controlada é fundamental para avançar na produção de mudas em viveiros amazônicos e, ao mesmo tempo, promover práticas alinhadas à economia circular (Rezende *et al.*, 2016; Almeida *et al.*, 2018; Araújo *et al.*, 2019).

O manejo nutricional é outro eixo essencial na produção de mudas (Nascimento; Pereira, 2016). A adubação convencional fornece macro e micronutrientes de forma imediata, favorecendo o crescimento rápido das plântulas, mas também acarreta riscos como perda por lixiviação e contaminação dos cursos d'água (Batista *et al.*, 2018). A alternativa que se apresenta são os fertilizantes de liberação controlada (FLC). Estes ganham espaço como tecnologia inovadora, por disponibilizarem nutrientes gradualmente, reduzindo perdas e aumentando a eficiência de uso, embora com maior custo (Araujo *et al.*, 2019). Evidências mostram que, em espécies florestais tropicais e palmeiras nativas, os FLC contribuem para o incremento de variáveis morfológicas e para a produção de mudas saudáveis e resistentes (Rossa *et al.*, 2015; Duboc *et al.*, 2018; Smiderle *et al.*, 2020).

O aproveitamento de resíduos agrícolas diretamente na propriedade rural, incluindo aqueles oriundos de culturas anuais e perenes, bem como do beneficiamento de frutos amazônicos como açaí e cupuaçu, constitui uma estratégia relevante para a promoção de sistemas agrícolas mais sustentáveis e alinhados aos princípios da economia circular (Sato *et al.*, 2020; Mendonça *et al.*, 2024; Dias *et al.*, 2024; Sousa Filho *et al.*, 2025). Em vez de considerar esses materiais como meros subprodutos ou descartes que geram custos logísticos e potenciais problemas ambientais, como a emissão de metano em aterros ou a contaminação de recursos hídricos, é imperativo visualizá-los como um recurso valioso. Por exemplo, as palhas,

caules, folhas e outros restos de culturas podem ser reintegrados ao ciclo produtivo por meio de práticas como a compostagem ou a produção de biochar, uma substância carbonácea estável que pode contribuir para a melhoria de propriedades do solo (Lehmann; Joseph, 2015). Tais práticas não apenas melhoram a estrutura, a retenção de água e a fertilidade do solo, mas também reduzem a dependência de fertilizantes sintéticos e contribuem para a mitigação de gases de efeito estufa. Os caroços e as cascas resultantes do despulpamento de frutos amazônicos, como o açaí e o cupuaçu, somam volumes expressivos de resíduos agroindustriais que, em grande parte, ainda são subutilizados (Fragoso *et al.*, 2014), apresentando potencial para agregação de valor e redução de impactos ambientais associados ao descarte.

O biochar melhora as propriedades físico-químicas do solo, aumenta a retenção de água e nutrientes e eleva a eficiência de uso de nutrientes, o que pode reduzir a dependência de fertilizantes convencionais e contribuir para práticas agrícolas mais sustentáveis (Bhat *et al.*, 2022).

Uma síntese quantitativa dos efeitos do biochar na produtividade agrícola é apresentada por Jeffery *et al.* (2011), por meio de uma meta-análise que integrou resultados de numerosos estudos independentes. Os autores identificaram um incremento médio aproximado de 10% no rendimento das culturas associado à aplicação do biochar, com respostas substancialmente superiores em solos com limitações edáficas, como aqueles degradados, ácidos ou de textura arenosa, nos quais aumentos expressivos de produtividade foram observados, alcançando valores próximos a 25% em determinados contextos experimentais. Esses resultados indicam que as alterações promovidas pelo biochar nas propriedades físicas e químicas do solo contribuem para um uso mais eficiente dos recursos disponíveis, reforçando o potencial desse insumo para aumentar a sustentabilidade dos sistemas produtivos, especialmente em ambientes caracterizados por baixa fertilidade.

Ao discutir os mecanismos envolvidos na dinâmica do nitrogênio no solo, Clough *et al.* (2013) destacam que o biochar pode atuar de maneira integrada sobre processos físico-químicos e biológicos. Segundo os autores, características como elevada área superficial específica, desenvolvimento progressivo da capacidade de troca catiônica e alta porosidade do material podem favorecer a retenção de nitrogênio no sistema solo-planta, contribuindo para a redução de perdas por lixiviação de nitrato (NO_3^-) e para a retenção de amônio (NH_4^+) na zona radicular. Além disso, a estrutura porosa do biochar pode criar microambientes favoráveis ao estabelecimento e à

atividade de comunidades microbianas responsáveis por transformações do nitrogênio. Em conjunto, esses efeitos indicam o potencial do biochar em melhorar a eficiência do uso do nitrogênio e mitigar impactos ambientais associados à perda desse nutriente, de forma dependente do tipo de material e das condições edáficas.

A aplicação de biochar é especialmente importante em viveiros amazônicos, onde o custo de produção de mudas é elevado, reforçando a necessidade de insumos de menor custo em relação aos de mercado. Nesse sentido, o objetivo desta tese foi avaliar o potencial sinérgico de biochars amazônicos e diferentes sistemas de adubação na produção de mudas de *Euterpe oleracea* Mart., da cultivar BRS Pai D'Égua, visando otimizar a eficiência produtiva e a sustentabilidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O AÇAIZEIRO

Na Amazônia, existem duas espécies produtoras de açaí, a *Euterpe oleracea* Mart., conhecida como açaí-de-touceira ou açaí-do-pará, predominante na Amazônia Oriental (Amapá, Pará, Mato Grosso e Maranhão) e principal responsável pela produção nacional; e *E. precatoria* Mart., nativa da Amazônia Ocidental, abrangendo o Amazonas, Acre e Rondônia, além dos países vizinhos, Peru e Bolívia. As espécies diferem principalmente pelo padrão vegetativo (touceiras em *E. oleracea* versus estipe único em *E. precatoria*), pelo ambiente de ocorrência (várzea sazonalmente inundável versus terra firme) e pelo papel nas cadeias produtivas (cultivo intensivo e dominante no mercado nacional versus extrativismo e abastecimento local). Essas distinções moldam estratégias de manejo e de política pública: enquanto *E. oleracea* ancora a produção comercial em escala, apoiada por sistemas de várzea adaptados ao pulso de cheias, *E. precatoria* sustenta circuitos extrativistas e comunitários na Amazônia ocidental, cuja valorização depende de arranjos logísticos, sanitários e de agregação de valor compatíveis com sua ecologia e distribuição (Brondizio, 2008).

Segundo a Pesquisa Agrícola Municipal do IBGE, a produção brasileira de açaí saltou de cerca de 1,4 milhão de toneladas em 2020 para aproximadamente 1,95 milhão em 2022, impulsionada pela expansão do cultivo e pela valorização do fruto; o Pará segue concentrando mais de 90% do total nacional (Fapespa, 2024).

2.2 PRODUÇÃO DE MUDAS DE AÇAIZEIRO-DE-TOUCEIRA

A produção de mudas florestais e frutíferas na Amazônia é estratégica tanto para a restauração ecológica quanto para o fortalecimento da bioeconomia regional, com destaque para espécies como açaí, jatobá, buriti, copaíba e andiroba. Revisões recentes apontam que Substratos orgânicos e organominerais são os mais utilizados na produção de mudas florestais amazônicas, em razão de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, que favorecem o desenvolvimento inicial das plantas (Rodrigues *et al.*, 2025).

Rodrigues *et al.* (2025) observaram maior concentração de estudos sobre a produção de mudas de açaí e jatobá entre 2019 e 2024, com destaque para o açaí,

cujo maior volume de publicações está associado à sua elevada demanda no mercado nacional e internacional. Além disso, o levantamento revelou a diversidade de substratos testados: 104 testes foram realizados, utilizando 69 substratos distintos, com 24 matérias primas diferentes. Entre os materiais mais frequentes estão casca de arroz, esterco, turfa, e substratos comerciais como Bioplant®, Tropstrato®, Carolina II®, Plantmax® e Basaplant®. Tais substratos visam equilibrar porosidade, retenção de água, pH adequado e suporte biológico ativo.

Oliveira *et al.* (2021) avaliaram a produção de mudas de açaí em substrato comercial à base de fibra de coco, misturado com areia e esterco, verificando que a formulação composta por 60% de substrato comercial, 20% de areia e 20% de esterco proporcionou os maiores ganhos em altura e diâmetro do coleto das mudas. O biochar pode atuar como condicionador de substrato e, quando associado à adubação fosfatada, apresentar efeitos positivos na disponibilidade de nutrientes e no desenvolvimento das plantas, configurando-se como uma estratégia de base sustentável no manejo nutricional (França, 2023).

Nesse contexto, A qualidade das mudas, avaliada por atributos morfológicos como o diâmetro do colo e o índice de qualidade de Dickson, apresenta relação com o desempenho em campo em curto prazo, embora essa associação varie conforme a espécie e as condições do sítio, conforme observado para *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Tachigali vulgaris* (Guimarães; Silva; Ferreira, 2024).

Adicionalmente, estudos realizados na Embrapa Acre com mudas de açaizeiro indicam que o manejo nutricional adequado na fase de viveiro é determinante para a produção de mudas de melhor qualidade, uma vez que a formação das mudas está diretamente relacionada ao desempenho das plantas em campo, evidenciando a importância de práticas de adubação ajustadas às condições de cultivo na Amazônia (Bezerra *et al.*, 2020).

2.3 BIOCHAR: CONCEITO, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

O biochar é um material sólido, rico em carbono, obtido por meio da pirólise de biomassas sob condições de disponibilidade limitada de oxigênio. Em razão de sua elevada estabilidade química, estrutura porosa e ampla área superficial específica, o biochar tem sido amplamente investigado como condicionador de solo, com potencial para melhorar a fertilidade edáfica, promover o sequestro de carbono e contribuir para

a sustentabilidade de sistemas produtivos e restaurativos (Antonangelo; Sun; Eufrade-Junior, 2025).

Revisões recentes da literatura indicam que a aplicação de biochar pode promover melhorias consistentes nas propriedades físicas do solo, particularmente no que se refere à porosidade, densidade aparente, infiltração e retenção de água (Premalatha *et al.*, 2023). De modo geral, esses efeitos são dose-dependentes, com incrementos progressivos da porosidade total e redução da densidade aparente à medida que aumentam as taxas de aplicação do material (Liu *et al.*, 2020). A incorporação de biochar tem sido associada, ainda, à redução da resistência mecânica do solo à penetração radicular e ao aumento da disponibilidade de água às plantas, especialmente em solos com limitações estruturais (Masulili *et al.*, 2010; Herath *et al.*, 2013).

Além dos efeitos físicos, o biochar exerce influência significativa sobre os atributos químicos do solo. Estudos experimentais demonstram que sua aplicação pode elevar o pH, a capacidade de troca catiônica e a disponibilidade de nutrientes, refletindo-se em melhorias no crescimento, na produtividade e na qualidade de culturas agrícolas (Adekiya *et al.*, 2025). Tais respostas, contudo, dependem fortemente da biomassa de origem, das condições de pirólise e das doses aplicadas, o que reforça a necessidade de manejo criterioso do insumo (Ippolito *et al.*, 2020; Tomczyk *et al.*, 2020). Em solos de textura grossa, por exemplo, o biochar tem se mostrado particularmente eficaz na melhoria da retenção hídrica e na redução da densidade aparente, embora seus efeitos sobre a permeabilidade possam variar conforme a profundidade de aplicação e o tamanho das partículas do material (Acharya *et al.*, 2019).

Sob a ótica biológica, o biochar tem sido amplamente descrito como um modificador do habitat edáfico, capaz de influenciar a biomassa, a composição e a diversidade da microbiota do solo. Sua elevada porosidade e estrutura interna favorecem a formação de nichos microbianos, promovendo o estabelecimento de fungos micorrízicos, bactérias promotoras de crescimento vegetal e outros grupos funcionais importantes para os processos de ciclagem de nutrientes (Nkoh *et al.*, 2021). Uma meta-análise abrangente, baseada em 181 estudos, demonstrou que os efeitos do biochar sobre as comunidades microbianas dependem fortemente de suas propriedades físico-químicas, como pH, temperatura de pirólise, taxa de aplicação e

tipo de biomassa, bem como das características do solo receptor, o que dificulta a definição de padrões universais de resposta (Deshoux *et al.*, 2023).

Em consonância com esses resultados, Qi *et al.* (2025) observaram que a aplicação de biochar promoveu alterações significativas na composição de comunidades microbianas do solo, incluindo bactérias, fungos, protistas e táxons raros, além de modificar as interações entre nutrientes e grupos microbianos. Essas mudanças estiveram associadas a um aumento aproximado de 35% no rendimento do trigo em relação ao tratamento controle, sugerindo uma relação positiva entre a reorganização do microbioma edáfico e o desempenho produtivo das plantas.

No contexto de sistemas agrícolas tropicais, evidências de longo prazo indicam que o biochar pode contribuir para o aumento sustentado da produtividade em solos altamente intemperizados. Major *et al.* (2010) demonstraram que a aplicação de biochar em um Latossolo de savana colombiana resultou em melhorias contínuas na nutrição e na produtividade do milho ao longo de quatro anos. Resultados semelhantes têm sido reportados em ambientes florestais e restaurativos, nos quais o biochar favoreceu o estabelecimento e o crescimento de espécies arbóreas em solos empobrecidos ou degradados (Guayasamín *et al.*, 2024).

Em sistemas hortícolas, o biochar também tem apresentado aplicações promissoras. Baronti *et al.* (2024) verificaram que a incorporação de biochar em proporções de até 30% em substratos utilizados na propagação de videiras em viveiro não ocasionou efeitos adversos ao sistema radicular, promovendo, ao contrário, melhorias na retenção hídrica do substrato, no potencial hídrico foliar e no desenvolvimento das raízes. Adicionalmente, Xu *et al.* (2024) observaram que a aplicação de biochar no solo rizosférico aumentou a disponibilidade de nutrientes e reduziu a absorção de metais pesados por plantas florestais, indicando seu potencial para uso em estratégias de remediação de solos contaminados ou de baixa fertilidade. Apesar dos inúmeros benefícios reportados, é importante destacar que os efeitos do biochar não são universalmente positivos. Marsh *et al.* (2023) relataram que, embora a aplicação de biochar tenha aumentado a taxa de sobrevivência de plântulas coníferas em aproximadamente 11%, não foram observados efeitos significativos sobre o crescimento em altura ou diâmetro. Esses resultados evidenciam que a eficácia do biochar é altamente dependente do contexto edafoclimático, do tipo de biochar e do sistema de cultivo adotado.

De forma geral, a literatura científica converge no sentido de que o biochar atua como um modificador integrado do habitat edáfico, influenciando propriedades físicas, químicas e biológicas do solo de maneira complexa e dependente de múltiplas variáveis. Essa complexidade reforça a necessidade de estudos de longo prazo, com maior ênfase na dinâmica da microbiota do solo, a fim de orientar sua aplicação racional tanto em sistemas produtivos quanto em estratégias de restauração ambiental (Deshoux *et al.*, 2023; Qi *et al.*, 2025; Sharma *et al.*, 2025).

2.4 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS AMAZÔNICOS PARA PRODUÇÃO DE BIOCHAR

A região amazônica gera grandes volumes de resíduos agroindustriais que, em muitos casos, ainda são subutilizados ou descartados de forma inadequada, representando perdas ambientais e econômicas. No caso do açaí, principal produto florestal não madeireiro da região, o caroço corresponde a aproximadamente 85% da massa total do fruto, acrescido de pequenas frações de polpa retidas durante o processamento (Pessoa *et al.*, 2010). Esse elevado volume de resíduo confere ao caroço de açaí um expressivo potencial como matéria-prima para a produção de biocarvão. Embora grande parte desse material ainda seja descartada, iniciativas recentes têm explorado seu aproveitamento para a produção de biochar, demonstrando a viabilidade técnica do uso de resíduos regionais como insumo agrícola e condicionador de solo rico em carbono estável, especialmente em solos amazônicos ácidos (Amazon biofert, 2025).

Em estudos realizados no Pará, Brasil, o biocarvão de sementes de açaí demonstrou eficácia na melhoria da qualidade do solo, com efeitos positivos sobre propriedades físico-químicas e no desenvolvimento de mudas de pimenta-do-reino, variando conforme as taxas de aplicação (Mendonça *et al.*, 2024)

Júnior *et al.* (2022) apresentam estudo sobre biomassas residuais de agroindústrias amazônicas, como de açaí e castanha-do-brasil. O uso de biochars produzidos a partir de resíduos amazônicos pode contribuir para a recuperação de solos contaminados ou degradados, incluindo a adsorção de metais pesados como Cd^{2+} e Cu^{2+} (Nobre *et al.*, 2023). Adicionalmente, estudos demonstram que o biochar de sementes de açaí pode melhorar a fertilidade do solo e favorecer o desenvolvimento vegetal (Mendonça *et al.*, 2024).

2.5 ADUBAÇÃO CONVENCIONAL E DE LIBERAÇÃO CONTROLADA DE MUDAS

A adubação de mudas em viveiro tem como objetivo fornecer nutrientes em quantidade e ritmo compatíveis com a demanda das plantas, elevando o índice de qualidade de Dickson (IQD) e a robustez morfológica para o transplântio. Em contraste com fontes solúveis convencionais, os fertilizantes de liberação controlada (FLC) liberam nutrientes gradualmente, reduzindo lixiviação e variações bruscas de salinidade no substrato (Cunha *et al.*, 2021).

Em espécies florestais tropicais, estudos controlados mostram ganhos consistentes de crescimento e qualidade com FLC. Em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden., uma revisão de desempenho de FLC em viveiros aponta incrementos em altura, massa seca e IQD, além de maior eficiência de uso de nutrientes quando comparado a adubações solúveis parceladas (Cunha *et al.*, 2021). Resultados similares foram registrados em *Campomanesia aurea* var. *hatschbachii* (Mattos) D. Legrand, em que doses entre 7–8 g L⁻¹ de FLC maximizaram altura, diâmetro do colo e área foliar, com respostas quadráticas típicas e melhor acúmulo de nutrientes na parte aérea (Emer *et al.*, 2020).

Para palmeiras amazônicas, evidências específicas reforçam o papel do FLC e do manejo nutricional. Em açaizeiro (*Euterpe oleracea*), combinação de sombreamento intermediário (30–50%) com FLC em torno de 8 kg m⁻³ de substrato gerou mudas de melhor qualidade morfológica e maior massa seca total, indicando que a entrega gradual de nutrientes favorece o crescimento equilibrado (Araújo *et al.*, 2019). Complementarmente, o ajuste de macronutrientes com fontes convencionais de potássio, como sulfato e silicato, promove a melhoria de atributos biométricos e da qualidade de mudas de açaizeiro em viveiro, evidenciando a importância do manejo nutricional adequado para a espécie e o substrato utilizados (Bezerra *et al.*, 2020).

A escolha do tipo e da taxa de FLC influencia não apenas o crescimento em viveiro, mas também o desempenho após o plantio. Em *Pinus tabuliformis* Carrière, na China, variações no tipo de cápsula/revestimento e nas doses afetaram o estado nutricional no viveiro e a sobrevivência e o crescimento em campo, com taxas intermediárias de N entregues por FLC apresentando melhor equilíbrio entre reservas e vigor (Wang; Li; Liu, 2022). De modo convergente, o ajuste de formulações N:P₂O₅ em FLC para *Taxus chinensis* (Pilg.) Rehrer e *Phoebe chekiangensis* C.B. Shang

mostrou que relações e doses ótimas melhoram reservas nutricionais pré-plantio e crescimento inicial no campo (Chu *et al.*, 2019).

Do ponto de vista ambiental, FLC pode reduzir perdas por lixiviação e emissões de gases de efeito estufa em comparação a fontes solúveis. Em cultivos de soja em rotação com arroz no Japão, o uso de FLC, inclusive nitrato revestido, em doses integrais ou reduzidas diminuiu as emissões anuais de N_2O (17–41%) sem penalizar a produtividade, sinalizando cobenefícios agronômicos e climáticos (Hasukawa *et al.*, 2021).

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, B. S.; DODLA, S.; WANG, J. J.; PAVULURI, K.; DARAPUNENI, M.; DATTAMUDI, S.; MAHARJAN, B.; KHAREL, G. Biochar effects on soil water holding capacity under different soil textures. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 18-26, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.001>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- ADEKIYA, A. O.; OGUNBODE, T. O.; ESAN, V. I.; ADEDOKUN, O.; OLATUBI, I. V.; AYEGBOYIN, M. H. Short-term effects of biochar on soil chemical properties, growth and yield attributes of tomatoes. **Scientific Reports**, v. 15, p. 10411, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10411-5>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- ALMEIDA, U. O.; ANDRADE NETO, R. C.; LUNZ, A. M. P.; NOGUEIRA, S. R.; COSTA, D. A.; ARAÚJO, J. M. Environment and slow-release fertilizer in the production of *Euterpe precatoria* seedlings. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 4, p. 382–389, 2018. DOI: 10.1590/1983-40632018v4847729.
- AMAZON BIOFERT.** O problema que resolvemos. Disponível em: <<https://www.amazonbiofert.com/>>. Acesso em: 01 jan. 2026.
- ANTONANGELO, J. A.; SUN, X.; EUFRADE-JUNIOR, H. J. Biochar impact on soil health and tree-based crops: a review. **Biochar**, v. 7, p. 51, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00450-6>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- ARAÚJO, C. S. D.; LUNZ, A. M. P.; SANTOS, V. B. D.; ANDRADE, R. D. C.; NOGUEIRA, S. R.; SANTOS, R. S. D. Use of agro-industry residues as substrate for the production of *Euterpe precatoria* seedlings. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, e58709, 2020. DOI: 10.1590/1983-40632020v5058709.
- ARAÚJO, J. M.; ANDRADE NETO, R. C.; LUNZ, A. M. P.; ALMEIDA, U. O. Shading and slow-release fertilizer effects on the growth characteristics of assai seedlings (*Euterpe oleracea*). **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, e20180019, 2019. DOI: 10.1590/2179-8087.001918.
- ARAÚJO, J. M.; ANDRADE NETO, R. C.; OLIVEIRA, J. R.; LUNZ, A. M. P.; ALMEIDA, U. O. Shading and slow release fertilizer effects on the growth characteristics of assai seedlings (*Euterpe oleracea*). **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, e20180019, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.001918>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- BARONA, E.; RAMANKUTTY, N.; HYMAN, G.; COOMES, O. T. *Spatially complex land change: The indirect effect of Brazil's agricultural sector on land use in Amazonia. Global Environmental Change*, v. 29, p. 1–9, 2014. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.06.011.

BARONTI, S.; MONTAGNOLI, A.; BEATRICE, P.; DANIELI, A.; MAIENZA, A.; VACCARI, F. P.; CASINI, D.; DI GENNARO, S. F. Above- and below-ground morpho-physiological traits indicate that biochar is a potential peat substitute for grapevine cuttings nursery production. **Scientific Reports**, v. 14, n. 17185, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-67766-4. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-67766-4>. Acesso em: 26 ago. 2025.

BATISTA, M. A.; INOUE, T. T.; ESPER NETO, M.; MUNIZ, A. S. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. In: BRANDÃO FILHO, J. U. T.; FREITAS, P. S. L.; BERIAN, L. O. S.; GOTO, R. (org.). **Hortaliças-fruto**. Maringá: EDUEM, 2018. p. 113–162. DOI: 10.7476/9786586383010.0006.

BAYMA, M. M. A.; AMARAL, E. F.; AFONSO, D. G.; AMARAL, E. F.; OLIVEIRA, L. C.; DONATO, V. G. N. Uso sustentável do bambu nativo do Acre, Amazônia, Brasil: potencial para a produção de bioplásticos, biochar e carvão vegetal. **ARACÊ**, v. 7, n. 4, p. 20281–20296, 2025.

BEZERRA, J. L. de S.; ANDRADE NETO, R. de C.; LUNZ, A. M. P.; ARAÚJO, J. M. de; ARAÚJO, C. S. de. Produção de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea*) em resposta a diferentes fontes e doses de potássio. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer – Jandaia-GO, v.17 n.33; p. 348, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1125302/producao-de-mudas-de-acaizeiro-euterpe-oleracea-em-resposta-a-diferentes-fontes-e-doses-de-potassio>. Acesso em: 26 ago. 2025.

BHAT, S. A.; KURIQI, A.; DAR, M. U. D.; BHAT, O.; SAMMEN, S. S.; ISLAM, A. R. M. T.; HEDDAM, S. Application of biochar for improving physical, chemical, and hydrological soil properties: a systematic review. **Sustainability**, v. 14, n. 17, p. 11104, 2022. DOI: 10.3390/su141711104.

BRONDIZIO, E. S. **The Amazonian Caboclo and the Açaí Palm: Forest, Agroforestry, and Economy in the Amazon Estuary**. New York: New York Botanical Garden Press, 2008.

CARVALHO, André Cutrim; CARVALHO, David Ferreira; SERRA, Maurício Aguiar; SILVEIRA, José Maria Ferreira Jardim da. *Expansão da fronteira agropecuária e a dinâmica do desmatamento florestal na Amazônia paraense sob a ótica da Nova Economia Institucional*. **REUNIR Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 43–75, 2014.

CHHETRI, R. K.; ARYAL, N.; KHAREL, S.; POUDEL, R. C.; PANT, D. Agro-based industrial wastes as potent sources of alternative energy and organic fertilizers. In: **Current developments in biotechnology and bioengineering**. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 121–136.

CHU, X.; WANG, X.; ZHANG, D.; WU, X.; ZHOU, Z. Responses of *Taxus chinensis* and *Phoebe chekiangensis* seedlings to controlled-release fertilizer in various formulations and application rates. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, v. 12, p. 254-261, 2019. Disponível em: <https://iforest.sisef.org/abstract/?id=ifor2714-012>. Acesso em: 26 ago. 2025.

CLOUGH, T. J.; CONDRON, L. M.; KAMMANN, C.; MÜLLER, C. A review of biochar and soil nitrogen dynamics. *Agronomy*, v. 3, n. 2, p. 275–293, 2013.

CUNHA, F. L.; NIERI, E. M.; MELO, L. A.; MIRANDA, E. N.; FERNANDES, T. J.; VENTURIN, N. Efficiency of slow release fertilizers in the production of *Eucalyptus grandis* seedlings. *Floresta e Ambiente*, v. 28, e20210059, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0059>. Acesso em: 26 ago. 2025.

DESHOUX, M.; SADET-BOURGETEAU, S.; GENTIL, S.; PRÉVOST-BOURÉ, N. C. Effects of biochar on soil microbial communities: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, v. 902, p. 166079, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166079>. Acesso em: 26 ago. 2025.

DIAS, Y. N.; PEREIRA, W. V. S.; CALDEIRA, C. F.; RAMOS, S. J.; SOUZA, E. S.; RIBEIRO, P. G.; FERNANDES, A. R. Açaí seed biochar-based phosphate fertilizers for improving soil fertility and mitigating arsenic-related impacts from gold mining tailings: synthesis, characterization, and lettuce growth assessment. *Minerals*, v. 14, n. 7, p. 732, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min14070732>. Acesso em: 25 ago. 2025.

DUBOC, E.; MOTTA, I. S.; SANTIAGO, E. F.; MEIRA, R.; NASCIMENTO, A. M.; MARTINI, L. V. R. Substrato orgânico e adubação com fertilizante de liberação controlada na produção de mudas de cedro-rosa (*Cedrela fissilis*). *Cadernos de Agroecologia*, v. 13, n. 2, p. 10, 2018.

EMER, A. A.; WINHELMANN, M. C.; TEDESCO, M.; FIOR, C. S.; SCHAFER, G. Controlled release fertilizer used for the growth of *Campomanesia aurea* seedlings. *Ornamental Horticulture*, v. 26, n. 1, p. 35-44, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v26i1.2020>. Acesso em: 26 ago. 2025.

FAPESPA – FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS. **Conjuntura da economia do açaí no Pará: nota técnica**. Belém: FAPESPA, 2024. Disponível em: <https://www.fapespa.pa.gov.br/wp-content/uploads/2024/06/Nota-Tecnica-Conjuntura-da-Economia-do-Acai-2024.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2025.

FERREIRA, R. L. da C.; BRAGA, D. G.; NASCIMENTO, V. R.; SILVA, C. B.; ALVES, A. C. B.; CABRAL, J. A. C.; CRUZ, F. J. R.; BRITO, A. E. A.; NOGUEIRA, G. A. S.; SOUZA, L. C.; CRUZ, E. D.; OLIVEIRA NETO, C. F. Biochar improves growth and physiology of *Swietenia macrophylla* King in contaminated soil by copper. *Scientific*

Reports, v. 14, n. 22546, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-74356-x>. Acesso em: 26 ago. 2025.

FRAGOSO, A. C.; ALCÂNTARA, L. V.; SILVA, C. P. G.; ARAÚJO, V. E. S.; SOUZA, M. J. R. **Minimização de impactos ambientais causados pelos caroços de açaí: o caso Telha Forte**. 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente Bento Gonçalves, 2014.

FRANÇA, R. F. da. **Viabilidade do biochar como veículo de inoculação para microrganismos solubilizadores de fosfato**. 2023. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2023. Disponível em: <https://rima.ufrj.br/jspui/handle/20.500.14407/22212>. Acesso em: 26 ago. 2025.

GUAYASAMÍN, P. D. R.; SMITH, S. M.; THOMAS, S. C. Biochar effects on NTFP-enriched secondary forest growth and soil properties in Amazonian Ecuador. **Journal of Environmental Management**, v. 350, p. 119068, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119068>. Acesso em: 24 ago. 2024.

GUIMARÃES, Z. T. M.; SILVA, D. C. da; 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. Disponível em: <https://iforest.sisef.org/contents/?id=ifor4317-016>. Acesso em: 26 ago. 2025.

HASUKAWA, H.; INODA, Y.; TAKAYAMA, T.; TAKEHISA, K.; SUDO, S.; AKIYAMA, H.; YANAI, J. Effects of controlled release N fertilizers and reduced application rate on nitrous oxide emissions from soybean fields converted from rice paddies. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 67, n. 6, p. 716-726, 2021.

HERATH, H. M. S. K.; CAMPS-ARBESTAIN, Marta; HEDLEY, Mike. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. **Geoderma**, v. 209, p. 188-197, 2013.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao_agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html. Acesso em: 26 ago. 2025.

IPPOLITO, J. A.; CUI, L.; KAMMANN, C.; WRAGE-MÖNNIG, N.; ESTAVILLO, J. M.; FUERTES-MENDIZÁBAL, T.; BORCHARD, N. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. **Biochar**, v. 2, n. 4, p. 421–438, 2020. DOI: 10.1007/s42773-020-00067-x.

JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; VAN DER VELDE, M.; BASTOS, A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 144, n. 1, p. 175-187, 2011.

JÚNIOR, C. D. C.; PIMENTA, A. S.; SOUZA, E. C.; PEREIRA, A. K. S.; JÚNIOR, A. F. D. Uso agrícola e florestal do biochar: estado da arte e futuras pesquisas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, e55711225999, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i2.25999.

JÚNIOR, L. D.; DE CASTRO, W. C.; BONATTO, E. C. S.; FALCÃO, N. P. de S. Caracterização de biocarvões produzidos com resíduos de açaí e castanha-do-Brasil / Characterization of biochar produced with waste from açai and Brazil nuts. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 27429–27442, 2022. DOI: 10.34117/bjd-v8n4-308. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/46638>. Acesso em: 2 dec. 2025.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. [S. l.]: Routledge, 2015.

LIU, D.; FENG, Z.; ZHU, H.; YU, L.; YANG, K.; YU, S. et al. Effects of corn straw biochar application on soybean growth and alkaline soil properties. **Bioresources**, v. 15, p. 1463-1481, 2020. DOI: 10.15376/biores.15.1.1463-1481. Acesso em: 26 ago. 2025.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S. J.; LEHMANN, J. Maize yield and nutrition during four years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. **Plant and Soil**, v. 333, n. 1, p. 117-128, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-010-0327-0>. Acesso em: 26 ago. 2025.

MANIRAJ, J.; RAMESH, M.; KUMAR, S. G.; SAHAYARAJ, A. F. Introduction of biochar: sources, composition, and recent updates. In: **Biochar and its composites: fundamentals and applications**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. p. 1–17.

MARSH, C.; BLANKINSHIP, J. C.; HURTEAU, M. D. Effects of nurse shrubs and biochar on planted conifer seedling survival and growth in a high-severity burn patch in New Mexico, USA. **Forest Ecology and Management**, v. 537, p. 120971, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723002050>. Acesso em: 26 ago. 2025.

MASULILI, A.; UTOMO, W. H.; SYECHFANI, M. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil: 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. **Journal of Agricultural Science**, v. 2, n. 1, p. 39-47, 2010. DOI: 10.5539/jas.v2n1p39. Acesso em: 25 ago. 2025.

MENDONÇA, M. S.; MELO, W. J.; MELO, G. M. P.; BERTIPAGLIA, L. M. A.; ARAUJO, A. S. F.; REIS, I. M. S.; ROCHA, S. M. B.; NOGUEIRA, T. A. R.; ABREU-JUNIOR, C. H.; JANI, A. D. Açai seed biochar improves soil quality and black pepper seedling development in the Amazon region. **Journal of Environmental Management**, v. 367, p. 121752, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121752>. Acesso em: 27 ago. 2024.

MICCOLIS, A.; PENEIREIRO, F. M.; MARQUES, H. R.; VIEIRA, D. L. M.; ARCOVERDE, M. F.; HOFFMAN, M. R.; REHDER, T.; PEREIRA, A. V. B. Guia técnico para restauração ecológica com sistemas agroflorestais: como conciliar conservação com produção – opções para cerrado e caatinga. 1ª Edição. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza – ISPN/Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal – ICRAF, 266p., 2016. Disponível em: <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/MN17387.pdf>. Acesso em: 22. dez. 2025.

NASCIMENTO, W. M.; PEREIRA, R. B. (ed.). **Produção de mudas de hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. 308 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1050963/1/Producao-de-Mudas-de-Hortalicas.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2026.

NKOH, J. N.; ABDULHAHA-AL BAQUY, M.; MIA, S.; SHI, R.; KAMRAN, M. A.; MEHMOOD, K.; XU, R. A critical-systematic review of the interactions of biochar with soils and the observable outcomes. **Sustainability**, v. 13, n. 24, p. 13726, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/24/13726>. Acesso em: 27 ago. 2025.

NOBRE, J. R. C.; QUEIROZ, L. S.; CASTRO, J. P.; PEGO, M. F. F.; HUGEN, L. N.; COSTA, C. E. F.; PARDAUIL, J. J. R.; NASCIMENTO, L. A. S.; ROCHA FILHO, G. N.; ZAMIAN, J. R.; SOUZA, E. C.; BIANCHI, M. L. Potential of agro-industrial residues from the Amazon region to produce activated carbon. **Heliyon**, v. 9, n. 7, e17189, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402303979>. Acesso em: 26 ago. 2025.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: carbono pirogênico para uso agrícola – uma revisão crítica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 321–344, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140618.

OLIVEIRA, A. B.; SOUZA, J. L. da C.; VIEIRA, M. do C.; VERA, R.; SOUZA, E. R. B. de. Desenvolvimento de mudas de açaí em diferentes tipos de substrato. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, e387101219327, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i12.19327>. Acesso em: 01 dez. 2025.

OTTOBONI, B. A.; ANDREANI JUNIOR, R. Sistemas agroflorestais: uma revisão de literatura. *Brasilian Journal of Business*, v. 7, n. 2, pp. 1-6, 2025. Disponível em:

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJB/article/view/80098>. Acesso em: 22 dez. 2025.

PESSOA, J. D. C.; ARDUIN, M.; MARTINS, M. A.; CARVALHO, J. E. U. Characterization of Açaí (*E. oleracea*) Fruits and its Processing Residues. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 53, n. 6, p. 1451-1460, nov./dez. 2010. Acesso em: 1 dez. 2025.

PREMALATHA, R. P.; BINDU, J. P.; NIVETHA, E.; MALARVIZHI, P.; MANORAMA, K.; PARAMESWARI, E.; DAVAMANI, V. A review on biochar's effect on soil properties and crop productivity. **Frontiers in Energy Research**, v. 11, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2023.1092637/full>. Acesso em: 27 ago. 2024.

QI, J. Q.; YUAN, H. Y.; SUN, S. C.; ZAMA, E. F.; TAO, B. X.; LIU, J.; ZHANG, B. H. Biochar amendment alters rare microbial taxa and enhances wheat growth in alkaline farmland: insights into soil microbiome dynamics. **Frontiers in Microbiology**, v. 16, 2025. DOI: 10.3389/fmicb.2025.1563712. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2025.1563712/full>. Acesso em: 26 ago. 2025.

REZENDE, F. A.; SANTOS, V. A. H. F.; MAIA, C. M. B. F.; MORALES, M. M. Biochar in substrate composition for production of teak seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1449–1456, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900011.

RODRIGUES, F. Q. Restauração florestal na Amazônia: caminhos, oportunidades e contingências. Manaus: Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia (IDESAM); Impact Hub Manaus, 2022.

RODRIGUES, J. I. de M.; MILHOMEM, C. de A.; SANTIAGO, W. R.; SANTOS JUNIOR, R. F. dos; MARTINS, W. B. R.; OLIVEIRA, F. de A. Substratos orgânicos e organominerais são os mais utilizados para a produção de mudas florestais amazônicas. **Nativa**, Sinop, v. 13, n. 2, p. 178-188, 2025. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/18959>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ROSSA, Ü. B.; ANGELO, A. C.; BOGNOLA, I. A.; WESTPHALEN, D. J.; MILANI, J. E. Fertilizante de liberação lenta no desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 85–96, 2015. DOI: 10.5380/rf.v45i1.36087.

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; MOONEY, S. J.; CLARKE, M.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F. Biochar as a sustainable alternative to açai waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 36-46, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.001>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SHARMA, M.; KAUSHIK, R.; PANDIT, M. K.; LEE, Y.-H. Biochar-induced microbial shifts: advancing soil quality through microbiome alteration. **Sustainability**, v. 17, n. 4, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/4/1748>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SIQUEIRA, E. S. **Uso de biochar na composição de substratos para produção de mudas de espécies florestais**. 2022. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, RN, 2022.

SMIDERLE, O. J.; MONTENEGRO, R. A.; SOUZA, A. D. G.; CHAGAS, E. A.; DIAS, T. J. Container volume and controlled-release fertilizer influence the seedling quality of *Agonandra brasiliensis*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, e62134, 2020. DOI: 10.1590/1983-40632020v5062134.

SOUSA FILHO, I. M. R. D.; SANTOS, C. A. A. D.; PAULINO, G. D. S.; ARAÚJO, A. J. C.; SOUSA, W. L. D.; ALVES, H. D. S.; VIEIRA, T. A.; LUSTOSA, D. C. Characterization of *Cupuaçu* (*Theobroma grandiflorum*) waste for substrate in seedling production. **Agriculture**, v. 15, p. 870, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15080870>. Acesso em: 25 ago. 2025.

TAVARES, Q. G.; ABRANCHES, M. O.; RIBEIRO, C. H. M.; MENDES, G. A.; PORTES, P. R.; PAULA, L. B. Uso do biochar como condicionador de substrato em cultivo de cenoura. **Revista Científica Rural**, v. 23, n. 2, p. 103–109, 2021.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 19, n. 1, p. 191–215, 2020. DOI: 10.1007/s11157-020-09523-3.

VAZ-JÚNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2020. 26 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 31).

WANG, M.; LI, G.; LIU, Y. Nursery fertilization affected field performance of Chinese pine container seedlings: effects of fertilization rate and controlled release fertilizer type. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 15, p. 400-408, 2022. Disponível em: <https://iforest.sisef.org/abstract/?id=ifor4080-015>. Acesso em: 26 ago. 2025.

XU, L.; WU, K. C.; DENG, Z. N.; HUANG, C. M.; VERMA, K. K.; PANG, T.; HUANG, H. R. Biochar reduces heavy metal uptake and improves nutrient availability for forest seedlings in contaminated soils. **International Journal of Phytoremediation**, v. 26, n. 5, p. 455-468, 2024. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17429145.2024.2401356>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ZHANG, X.; QU J.; LI H.; LA, S.; TIANA, Y.; GAO, L. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region. **Geoderma**, Amsterdam, 363:114170, 2020.

3 CAPÍTULO I

BIOCHAR AMAZÔNICO COMO SUBSTRATO SUSTENTÁVEL: DESEMPENHO DE MUDAS DE AÇAIZEIRO SOB DIFERENTES FONTES E CONCENTRAÇÕES

RESUMO.

A agricultura amazônica enfrenta desafios crescentes decorrentes das mudanças climáticas e da degradação ambiental, o que demanda soluções sustentáveis que aproveitem resíduos agroindustriais regionais e favoreçam a produção de mudas de espécies nativas. Nesse contexto, o biochar se destaca como alternativa promissora para o aprimoramento de substratos, promovendo ganhos agronômicos e ambientais. Assim, este estudo tem como objetivo avaliar o efeito de três fontes de biochar derivados de resíduos amazônicos, casca de cupuaçu, casca de amêndoa de castanha-do-brasil e caroço de açaí, em diferentes concentrações, associadas à adubação de fertilizante convencional, sobre a qualidade de mudas de *Euterpe oleracea* Mart., cultivar BRS Pai d'Égua. O experimento foi conduzido em viveiro, no delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 3x6, com cinco concentrações de biochar (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) e uma testemunha (0%), totalizando 54 unidades amostrais, sendo avaliadas variáveis de crescimento vegetativo, biomassa e Índice de Qualidade de Dickson (IQD). Os resultados mostram que o biochar de casca de cupuaçu apresenta composição nutricional superior, elevada capacidade de retenção de água e propriedades físicas favoráveis, o que promove incrementos em altura, diâmetro do colo e acúmulo de biomassa, refletidos em valores elevados de IQD; além disso, concentrações entre 20% e 30% de biochar de casca de cupuaçu e de castanha-do-brasil otimizam o desenvolvimento e o equilíbrio morfológico das mudas, enquanto número de folhas, índice SPAD e relação parte aérea/raiz permanecem estáveis, evidenciando efeito complementar do biochar à adubação. Conclui-se que o biochar de casca de cupuaçu se configura como alternativa eficiente e sustentável para a produção de mudas vigorosas de açaizeiro, fortalecendo a qualidade do viveiro e favorecendo práticas de agricultura regenerativa na Amazônia.

Palavras-chave: Biocarvão. *Euterpe oleracea* Mart. Qualidade de mudas. Resíduos agroindustriais.

ABSTRACT

Amazonian agriculture faces increasing challenges arising from climate change and environmental degradation, which require sustainable solutions that make use of regional agro-industrial residues and support the production of seedlings of native species. In this context, biochar stands out as a promising alternative for improving growing substrates, providing both agronomic and environmental benefits. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of three biochar sources derived from Amazonian residues, cupuaçu husk, Brazil nutshell, and açaí stone, applied at different concentrations and combined with conventional fertilizer, on the quality of *Euterpe oleracea* Mart. seedlings, cultivar BRS Pai d'Égua. The experiment was conducted in a nursery using a randomized block design in a 3 × 6 factorial arrangement, comprising five biochar concentrations (10%, 20%, 30%, 40%, and 50%) and a control treatment (0%), totaling 54 experimental units. Vegetative growth variables, biomass accumulation, and the Dickson Quality Index (DQI) were evaluated. The results indicate that cupuaçu husk biochar exhibits superior nutritional composition, high water retention capacity, and favorable physical properties, which promote increases in plant height, stem diameter, and biomass accumulation, reflected in high DQI values. In addition, biochar concentrations between 20% and 30% from cupuaçu husk and Brazil nut shell optimize seedling development and morphological balance, while leaf number, SPAD index, and shoot-to-root ratio remain stable, demonstrating a complementary effect of biochar in relation to conventional fertilization. It is concluded that cupuaçu husk biochar represents an efficient and sustainable alternative to produce vigorous açaí palm seedlings, enhancing nursery quality and supporting regenerative agricultural practices in the Amazon.

Keywords: Biochar. *Euterpe oleracea* Mart. Seedling quality. Agro-industrial residues. Regenerative agriculture.

3.1 INTRODUÇÃO

A produção de mudas de espécies florestais na Amazônia é uma etapa estratégica e fundamental para o sucesso de programas de reflorestamento, sistemas agroflorestais e o desenvolvimento de cultivos sustentáveis. O desempenho inicial dessas mudas em campo é intrinsecamente ligado à qualidade do substrato utilizado em viveiros, tornando essencial a busca por alternativas que unam baixo custo, sustentabilidade e alta eficiência agronômica (Natalli *et al.*, 2024).

Dentre essas alternativas, o biochar, um material carbonáceo obtido pela pirólise de biomassa em condições de oxigênio limitado, tem ganhado destaque na literatura científica (Lehmann; Joseph, 2015). Nos últimos anos, seu potencial para melhorar atributos físicos e químicos do solo tem sido amplamente investigado, com evidências de aumento da retenção de água, redução da acidez e elevação da capacidade de troca catiônica, efeitos que dependem do tipo de biochar, do solo e das condições de uso, conforme discutido por Lehmann e Joseph (2015).

Além dos efeitos sobre atributos químicos do solo, o biochar apresenta potencial para influenciar a retenção e a disponibilidade de nutrientes essenciais ao crescimento vegetal. A meta-análise conduzida por Sun *et al.* (2022) demonstrou que a aplicação de biochar promove aumentos significativos no pH do solo e em parâmetros relacionados à fertilidade química, como a capacidade de troca catiônica e os teores de bases trocáveis, efeitos que podem contribuir indiretamente para a redução de perdas de nutrientes e para o aumento da eficiência do uso de fertilizantes minerais. Isso ocorre porque o biochar atua como uma esponja molecular, que aprisiona e libera os nutrientes de forma mais gradual, evitando perdas e otimizando a nutrição da planta (Boschiero, 2023).

A Amazônia, com sua ampla disponibilidade de resíduos agroindustriais, como caroços de açaí, cascas de cupuaçu e amêndoas de castanha-do-brasil, constitui uma fonte promissora e sustentável para a produção de biochar. Biochars derivados desses resíduos amazônicos apresentam composição química com teores relevantes de nutrientes e propriedades físicas favoráveis, como elevada porosidade e pH alcalino, características que indicam seu potencial de uso como insumo sustentável em sistemas agrícolas e na formulação de substratos para viveiros (Júnior *et al.*, 2022; Dias *et al.*, 2024). No caso do cupuaçu, estudos recentes demonstram que seus resíduos *in natura* apresentam elevado teor de nutrientes e características físicas

adequadas ao uso como substrato (Sousa Filho *et al.*, 2025). Por exemplo, o biochar de sementes de açaí tem se mostrado particularmente eficaz. Mendonça *et al.* (2024) observaram que a incorporação do biochar de sementes de açaí ao solo melhorou atributos de fertilidade e propriedades físicas relacionadas à dinâmica da água, promovendo o crescimento de mudas de pimenta-do-reino, inclusive em concentrações moderadas. Esses achados demonstram que o reaproveitamento inteligente de resíduos regionais pode gerar insumos valiosos para diversas culturas.

Outro ponto crucial refere-se à viabilidade ambiental e ao potencial econômico da produção local de biochar. Estudos indicam que sua utilização pode reduzir a dependência de fertilizantes minerais, ao melhorar a eficiência no uso de nutrientes e a fertilidade do solo (Dias *et al.*, 2024). Adicionalmente, a aplicação de biochar de sementes de açaí tem demonstrado efeitos positivos sobre atributos físico-químicos do solo e sobre o crescimento vegetal (Mendonça *et al.*, 2024), indicando a possibilidade de redução indireta de custos de produção e de impactos ambientais associados ao uso intensivo de insumos externos. Esse modelo de aproveitamento de resíduos agroindustriais alinha a produção agrícola aos princípios da economia circular, ao transformar subprodutos em insumos de valor agrônomo, e contribui para a mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono estável no solo (Antonangelo *et al.*, 2025).

Os efeitos do biochar, contudo, não são uniformes e variam amplamente em função da matéria-prima utilizada, das condições de pirólise (como temperatura e tempo de processamento) e da proporção aplicada ao solo. Sun *et al.* (2022) e Premalatha *et al.* (2023) destacam que diferentes biochars podem apresentar variações significativas na disponibilidade de nutrientes, na condutividade elétrica e na capacidade de retenção de água, em grande parte devido às interações entre as propriedades do material e as características do solo receptor. Esses resultados ressaltam a importância de avaliações comparativas e específicas para cada contexto edáfico e sistema de uso.

A valorização de resíduos agroindustriais amazônicos como matéria-prima para a produção de biochar configura-se como uma estratégia alinhada aos princípios da bioeconomia e da economia circular. O processamento de produtos como açaí, castanha-do-brasil e cupuaçu gera anualmente grandes volumes de resíduos orgânicos, que, quando descartados de forma inadequada, podem ocasionar impactos ambientais como poluição hídrica, proliferação de vetores e emissões de gases de

efeito estufa decorrentes da decomposição da biomassa (Pessoa *et al.*, 2010; Júnior *et al.*, 2022). A conversão desses resíduos em biochar reduz passivos ambientais e, simultaneamente, viabiliza a geração de insumos de maior valor agregado, com potencial aplicação em viveiros florestais e sistemas agroflorestais. Essa abordagem integra mitigação ambiental e incremento produtivo, favorecendo a produção de mudas de espécies nativas de relevância econômica e ecológica, além de contribuir para estratégias de manejo sustentável do solo. Tais práticas estão alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em especial o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) (ONU, 2015).

A produção de mudas de *Euterpe oleracea* Mart., o açaizeiro, é um pilar socioeconômico da Amazônia e, portanto, demanda especial atenção quanto à qualidade de seus substratos. A escolha do substrato adequado é crucial, pois influencia diretamente a germinação, o enraizamento e o desenvolvimento inicial das plântulas (Natalli *et al.*, 2024). Rodrigues *et al.* (2025) destacam que substratos orgânicos e organominerais são os mais empregados na produção de mudas de espécies florestais amazônicas, em função de suas propriedades físicas e químicas, como porosidade, capacidade de retenção hídrica e adequação do pH. Diante desse panorama, é fundamental compreender como diferentes fontes de biochar, incorporadas a esses substratos, podem influenciar a qualidade das mudas de açaizeiro.

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito de diferentes concentrações de biochar de casca de cupuaçu, casca de amêndoa de castanha-do-brasil e caroço de açaí na composição de substrato comercial sob adubação de fertilizante convencional NPK + micronutrientes, na produção de mudas de açaizeiro-de-touceira da cultivar BRS Pai d'Égua.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no viveiro de produção de mudas da Embrapa Acre, em Rio Branco, AC (10°01'25,95" S e 67°42'04,71" O), de março a dezembro de 2023. O clima regional, classificado como Am (Köppen), é de monções tropicais (Uchoa *et al.*, 2024).

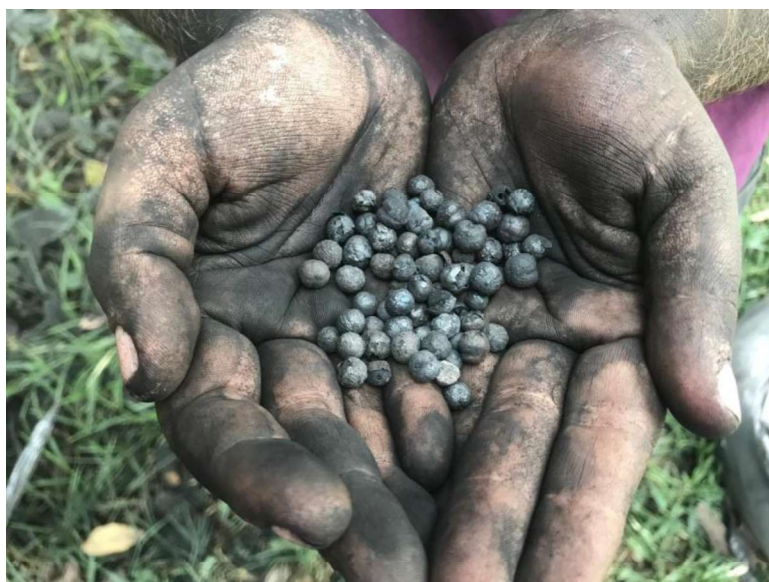
O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC), com três repetições, em esquema fatorial 3 x 6, totalizando 18 tratamentos. Estes foram compostos por três tipos de biochars, oriundos de diferentes resíduos agroindustriais (casca de cupuaçu, casca de amêndoa de castanha e caroço de açaí) e seis proporções volumétricas distintas dos biochars incorporadas ao substrato misto para plantas, Maxfertil (0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%). Cada unidade experimental foi composta por quatro mudas.

As sementes pré-germinadas de açaí-de-touceira, da variedade BRS Pai d'Égua, com 70% de umidade e 85% de poder germinativo, foram adquiridas da empresa Amazonflora, localizada em Marituba, Pará, com registro no Renasem PA-00221/2007. Inicialmente, as sementes foram dispostas em bandejas com vermiculita expandida, em sala de germinação com temperatura controlada no Laboratório de Sementes Florestais (Lasfac) da UFAC (Figura 1). Após 42 dias, as plântulas em estágio de "ponto palito" foram transplantadas para tubetes de 900 mL, dispostos em bancadas de ferro a 1,20 m do solo, em viveiro telado com sombrite de cor preta de 50% de sombreamento (Figura 1).

Figura 1. Viveiro de produção de mudas da Embrapa Acre, em Rio Branco-AC, com mudas de açaí-de-touceira transplantadas em tubetes de 900 mL sob sombreamento de 50%



Figura 2. Resíduos agroindustriais de açaí obtido por pirólise em forno artesanal, utilizado como componente do substrato no experimento



Os biochars foram produzidos via pirólise, utilizando um forno artesanal, com matérias-primas de resíduos agroindustriais coletados em Rio Branco e Plácido de Castro. O biocarvão de caroço de açaí (Figura 2) foi obtido a 300 °C por 120 horas

(Barbosa *et al.*, 2024); o de casca de amêndoa de castanha-do-brasil a 250-350 °C por 96 horas; e o de casca de cupuaçu a 250-350 °C por 10 horas. Após carbonização, os materiais foram triturados e combinados com o substrato comercial Maxfertil, composto por 85% casca de pinus compostada, 10% vermiculita e 5% casca de arroz carbonizada, aditivado com NPK, apresentando condutividade elétrica de $0,50 \pm 0,30$ mS/cm, pH de $6,0 \pm 0,5$, umidade máxima de 58%, retenção de água de 90% e densidade de 310 kg/m³.

A adubação convencional foi realizada em cobertura, quinzenalmente, a partir da completa expansão da primeira folha da plântula. Aplicou-se 0,31 g do formulado NPK + micronutrientes por tubete, equivalente a 344 g.m⁻³ de substrato. Este formulado foi obtido pela mistura de ureia (45% N), superfosfato simples (18% P₂O₅), superfosfato triplo (46% P₂O₅), cloreto de potássio (60% K₂O) e sulfato de magnésio (1% K₂O; 11,8% S; 9% Mg). Os micronutrientes foram fornecidos via FTE BR 12 (3,9% S; 1,8% B; 0,85% Cu; 2% Mn). As concentrações desses componentes foram balanceadas para mimetizar a formulação do fertilizante de liberação controlada Basacote® Plus 12M, cuja composição inclui 15% de nitrogênio total (7% nítrico e 8% amoniacal); 8% de P₂O₅ (5,6% solúvel em água); 12% de K₂O totalmente solúvel; 2% de MgO (1,4% solúvel); 5% de SO₃ (4% solúvel em água); e micronutrientes essenciais: 0,02% B, 0,05% Cu, 0,40% Fe (0,15% quelatado por EDTA), 0,06% Mn, 0,015% Mo e 0,02% Zn.

As misturas de Maxfertil e os três tipos de biochars foram enviadas para a caracterização físico-química dos substratos foi conduzida em laboratório acreditado, seguindo metodologias oficiais estabelecidas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). As amostras foram submetidas à análise completa, incluindo determinação de macro e micronutrientes extraídos em água, pH em água (20%), condutividade elétrica (1:5 v/v), teor de umidade por secagem a 65 °C e quantificação de matéria orgânica pelo método MP FERT 01. Nitrogênio total e nitrogênio amoniacal foram determinados pelo método Kjeldahl, enquanto fósforo e enxofre foram quantificados por espectrofotometria UV-VIS. Potássio, sódio e outros cátions foram analisados por espectrometria de emissão, e cálcio, magnésio e micronutrientes metálicos por espectrometria de absorção atômica. A capacidade de retenção de água foi determinada gravimetricamente, e as cinzas foram estimadas por cálculo a partir da matéria orgânica.

A densidade aparente foi estimada pela relação massa-volume em base seca, enquanto a capacidade de troca catiônica (CTC) foi quantificada segundo protocolos MAPA específicos para substratos. A relação carbono/nitrogênio (C/N) e o carbono orgânico total foram determinados conforme metodologias padronizadas para insumos agrícolas. Todos os procedimentos seguiram padrões de qualidade analítica, com limites de quantificação e valores de referência reportados no próprio laudo, garantindo a rastreabilidade e a comparabilidade dos resultados. Esses parâmetros permitiram avaliar de forma integrada a fertilidade química, a estabilidade do biochar e seu potencial como componente de substratos hortícolas.

No viveiro, o sistema de irrigação era totalmente automatizado, programado para operar três vezes ao dia, com ciclos variando entre 5 e 6 minutos, de modo a manter a umidade do substrato dentro da faixa adequada ao desenvolvimento das mudas. Esse manejo hídrico homogêneo contribuiu para reduzir variações ambientais e assegurar condições uniformes entre os tratamentos. O manejo fitossanitário foi realizado preventivamente por meio da aplicação semanal de fungicida registrado para uso em viveiros, visando ao controle de antracnose, doença recorrente em ambientes úmidos e sombreados. Além disso, o controle de plantas espontâneas foi conduzido exclusivamente de forma manual, mediante capinas regulares, a fim de evitar competição por água, luz e nutrientes, garantindo condições adequadas para o crescimento das plântulas.

As avaliações das mudas foram realizadas ao longo de 10 meses após a repicagem das plântulas. O experimento foi instalado em 03 de março de 2023 e, a primeira avaliação realizada em 09 de maio. A última coleta de dados, da fase destrutiva, foi em 09 de janeiro de 2024. Foram conduzidas cinco avaliações distribuídas ao longo do ciclo de crescimento, permitindo acompanhar a dinâmica de desenvolvimento das plantas.

As variáveis mensuradas incluíram: (a) número de folhas abertas (NF), obtido por contagem direta das folhas completamente expandidas; (b) altura da planta (AP), medida da base do colo até a gema apical com régua milimetrada (cm); (c) diâmetro do colo (DC) (mm), determinado na linha do substrato com paquímetro digital; e (d) relação altura/diâmetro do colo (RAD), calculada dividindo-se AP por DC, utilizada como indicador de equilíbrio estrutural e robustez das mudas. Para estimar o acúmulo de biomassa, foram quantificadas as massas secas da parte aérea (MSPA) (g), das raízes (MSR) (g) e a massa seca total (MST) (g), após secagem em estufa a 65 °C

até massa constante e pesagem em balança analítica. A razão parte aérea/raiz (RPAR), obtida por MSPA/MSR, permitiu avaliar a distribuição de biomassa entre compartimentos. A qualidade das mudas foi avaliada por meio do Índice de Qualidade de Dickson (IQD), conforme descrito por Dickson *et al.* (1960). O IQD foi calculado utilizando a fórmula:

$$\frac{\text{MST (g)}}{\left(\frac{\text{AP (cm)}}{\text{DC (mm)}}\right) + \left(\frac{\text{MSPA (g)}}{\text{MSR (g)}}\right)}$$

O Índice SPAD, que reflete o teor relativo de clorofila, foi medido entre 08: 00h e 11: 00h da manhã, com o uso do clorofilômetro portátil SPAD 502. As leituras foram realizadas na folha mais nova, totalmente expandida e sadia, de quatro plantas por parcela.

Para a análise estatística, os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro e Wilk (Shapiro, 1965) e homogeneidade de variâncias de Bartlett (1937). Após atender aos pressupostos, realizou-se a análise de variância (ANOVA). Quando significativos (teste F de Snedecor e Cochran, 1948), as médias das fontes de biochar foram comparadas pelo teste de Tukey (1949), e os dados das concentrações por análise de regressão. Todas as análises foram realizadas no R Studio (Rstudio Team, 2023), com 5% de significância.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação dos biochars e seu impacto no crescimento de mudas de açaizeiro revelou informações cruciais sobre o potencial desses materiais como condicionadores de substrato.

3.3.1 Análise Físico-Química dos Biochars e Implicações para o Crescimento de Mudas

A análise físico-química dos substratos com biochars de casca de cupuaçu (CUP), casca de amêndoa de castanha-do-brasil (CAS) e caroço de açaí (AÇA), em combinação com substrato comercial Maxfertil (Tabela 1), demonstrou que o CUP apresenta um perfil nutricional superior e características físicas mais favoráveis, se destacando pelos maiores teores de nitrogênio ($56,0 \text{ g.kg}^{-1}$), fósforo ($229,56 \text{ g.kg}^{-1}$), cálcio ($24,8 \text{ g.kg}^{-1}$), magnésio ($13,0 \text{ g.kg}^{-1}$), enxofre ($399,6 \text{ g.kg}^{-1}$), ferro ($61,2 \text{ mg.kg}^{-1}$), boro ($83,77 \text{ mg.kg}^{-1}$), manganês ($1,2 \text{ mg.kg}^{-1}$) e zinco ($0,25 \text{ mg.kg}^{-1}$), especialmente na concentração de 50%.

Esses elementos são essenciais para processos como crescimento vegetativo, fotossíntese e formação radicular, corroborando com Sousa Filho *et al.* (2025), que apontaram resíduos de cupuaçu como ricos em macro e micronutrientes, além de possuírem características físicas desejáveis como baixa densidade e alta porosidade, que favorecem aeração e retenção hídrica em viveiros.

Embora o biochar de sementes de açaí (AÇA) apresente características distintas de outros resíduos amazônicos, Mendonça *et al.* (2024) demonstraram que sua incorporação ao solo melhora atributos físico-químicos e promove o crescimento de mudas de pimenta-do-reino. Esses resultados indicam que, além de fornecer nutrientes, o biochar atua como modulador da fertilidade e da dinâmica biológica do substrato.

A resposta positiva observada no presente estudo pode estar associada à interação entre a composição do biochar, as condições de pirólise e o manejo da adubação mineral. Nesse contexto, estudos com biochar produzido a partir de resíduos de açaí evidenciam que esse material apresenta potencial para melhorar principalmente a qualidade química do solo, além de representar uma alternativa sustentável para a destinação e o manejo de resíduos agroindustriais na Amazônia (Sato *et al.*, 2020), como o cupuaçu, devido à sua riqueza nutricional e propriedades físicas.

Tabela 1. Análise físico-química de substratos com biochar de casca de amêndoa da castanha-do-brasil (CAS), biochar de casca de cupuaçu (CUP) e biochar de caroço de açaí (AÇA) em combinação com substrato comercial Maxfertil. Rio Branco, AC, 2025

CAS (%)	pH	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	B	Cu	Mn	Zn
g.kg ⁻¹						mg.kg ⁻¹						
0	5,0	1,5	126,16	73,0	25,40	18,30	103,4	3,8	77,18	0,07	0,4	0,05
10	5,5	5,5	23,6	142,5	10,80	6,04	92,33	29,8	87,07	0,05	0,6	0,07
20	6,0	4,8	28,5	217,5	8,20	4,40	93,53	16,8	87,07	0,02	0,5	0,05
30	6,1	4,1	23,26	255,0	6,20	3,10	69,62	16,8	77,18	0,02	0,5	0,05
40	6,4	5,0	35,99	310	6,8	3,18	84,68	21,2	77,18	0,03	0,5	0,05
50	6,5	6,5	36,65	280,0	6,8	3,24	92,33	22,4	80,47	0,01	0,4	0,06
CAS (%)	C/N	Umidade	M.O.	C.O.	Cinzas	CRA	CTC	CE	DU	DS		
		%				mmolc/kg ⁻¹		dS/m ⁻¹				
0	75	44,55	55,16	24,89	44,84	77,00	600	0,51	0,55	0,30		
10	51	33,65	64,33	26,18	35,67	71,46	400	0,62	0,54	0,36		
20	38	30,85	73,45	26,68	26,55	73,64	400	0,85	0,55	0,38		
30	53	32,61	58,98	28,85	41,02	65,63	410	0,82	0,55	0,37		
40	39	23,58	69,01	29,27	30,99	73,85	370	0,92	0,56	0,43		
50	43	19,08	79,63	32,62	20,37	69,18	220	0,54	0,54	0,44		
CUP (%)	pH	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	B	Cu	Mn	Zn
g.kg ⁻¹						mg.kg ⁻¹						
0	5,0	1,5	126,1	73,0	25,40	18,30	103,4	3,8	77,18	0,07	0,4	0,05
10	5,6	4,3	18,16	202,5	8,6	5,28	85,13	20,4	83,77	0,02	0,6	0,06
20	5,9	5,2	27,26	197,5	7,4	6,32	147,1	44,8	96,99	0,05	0,6	0,01
30	6,5	10,1	35,35	210,0	7,40	3,30	96,23	22,6	80,47	0,05	0,4	0,07
40	7,0	19	54,96	212,5	12,4	6,0	142,5	35,6	73,89	0,07	0,6	0,11
50	7,4	56	229,56	375	24,8	13	399,6	61,2	83,77	0,02	1,2	0,25
CUP (%)	C/N	Umidade	M.O.	C.O.	Cinzas	CRA	CTC	CE	DU	DS		
		%				mmolc/kg ⁻¹		dS/m ⁻¹				
0	75	44,55	55,16	24,89	44,84	77,00	600	0,51	0,55	0,30		
10	61	35,95	64,80	28,57	35,2	77,13	430	0,67	0,67	0,35		
20	58	35,40	58,90	26,05	41,10	69,34	540	0,66	0,66	0,33		
30	63	31,12	71,97	33,63	28,03	90,52	420	0,67	0,67	0,36		
40	74	32,92	66,44	33,22	33,56	75,96	430	0,77	0,5	0,34		
50	61	38,81	69,01	35,33	30,99	88,06	370	1,00	0,52	0,32		
AÇA (%)	pH	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	B	Cu	Mn	Zn
g.kg ⁻¹						mg.kg ⁻¹						
0	5,0	1,5	126,1	73,0	25,4	18,30	103,4	3,8	77,18	0,07	0,4	0,05
10	5,7	3,2	39,98	202,5	11,6	9,30	97,48	17,2	87,07	0,02	0,6	0,05
20	5,9	3,3	62,15	250,0	8,0	7,16	90,19	17,4	83,77	0,01	0,7	0,05
30	6,4	4,0	95,55	215,0	7,2	6,52	158,1	17,8	80,47	0,02	0,7	0,06
40	6,3	4,9	127,9	370,0	2,8	6,52	124,2	16,3	80,47	0,02	0,7	0,06
50	6,5	5,4	185,5	440,0	6,4	7,36	117,7	15,2	73,89	0,03	0,8	0,09
AÇA (%)	C/N	Umidade	M.O.	C.O.	Cinzas	CRA	CTC	CE	DU	DS		
		%				mmolc/kg ⁻¹		dS/m ⁻¹				
0	75	44,55	55,16	24,89	44,84	77,00	600	0,51	0,55	0,30		
10	45	33,41	64,82	27,90	35,18	65,65	400	0,74	0,57	0,38		
20	51	31,71	66,54	28,30	33,46	77,08	380	0,80	0,60	0,41		
30	36	29,59	70,31	29,49	29,69	61,65	160	0,89	0,61	0,43		
40	43	28,69	69,26	29,50	30,74	55,21	210	1,15	0,64	0,46		
50	29	29,39	72,53	28,85	27,47	62,03	210	1,33	0,64	0,45		

¹Relação C/N; ²Umidade a 65 °C; ³Matéria orgânica (M.O); ⁴Carbono orgânico (C.O); ⁵Capacidade de Retenção de água (CRA); ⁶Capacidade de troca catiônica (CTC); ⁷Condutividade elétrica (CE), ⁸Densidades úmida (DU) e seca (DS)

Analisando os macronutrientes, o AÇA apresentou elevadas concentrações de fósforo (185,5 g.kg⁻¹) e potássio (440 g.kg⁻¹), enquanto o CUP mostrou maior teor de

nitrogênio. O CAS, por sua vez, manteve estabilidade em cálcio ($6,8\text{--}25,4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) e magnésio ($3,1\text{--}18,3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). O nitrogênio desempenha papel fundamental no crescimento do açaizeiro, sendo comum a observação de respostas positivas da cultura à adubação nitrogenada, especialmente em solos de baixa fertilidade natural (Viégas *et al.*, 2008), o que reforça a vantagem do CUP.

A relação carbono/nitrogênio (C/N) diminuiu com o aumento da concentração de biochar, com o AÇA destacando-se por valores mais baixos (C/N 29 a 50%). De acordo com Cantarella (2007), a relação C/N dos resíduos orgânicos é um dos principais fatores que regulam os processos de mineralização e imobilização do nitrogênio no solo, sendo que relações mais baixas tendem a favorecer a mineralização. Contudo, o CUP apresentou C/N mais elevada (50 a 61%), o que sugere uma liberação mais gradual de nutrientes. Biochars com relações C/N elevadas tendem a apresentar maior estabilidade e efeitos mais prolongados na dinâmica de nutrientes do solo, conforme discutido por Deluca *et al.* (2015).

A capacidade de retenção de água (CRA) foi superior no CUP (88,06% a 50%), atingindo 90,52 mmolc/kg na dose de 30%. Essa alta CRA é crucial em viveiros tropicais, onde a estabilidade hídrica influencia diretamente a absorção de nutrientes. Glaser, Lehmann e Zech (2002) destacam que a adição de carvão vegetal pode melhorar propriedades físicas e químicas de solos tropicais altamente intemperizados, como a estrutura e a porosidade, o que pode influenciar indiretamente a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes no solo.

A densidade do CUP observada neste estudo (densidade úmida de $0,50\text{--}0,67\text{ g cm}^{-3}$ e densidade seca de $0,32\text{--}0,36\text{ g cm}^{-3}$) caracteriza um substrato leve. Em sistemas de produção de mudas, substratos com baixa densidade seca tendem a apresentar maior porosidade e adequado espaço de aeração, favorecendo as trocas gasosas e o crescimento radicular, conforme descrito para substratos hortícolas por Schafer *et al.* (2015). Estudos conduzidos em solos agrícolas indicam que a aplicação de biochar pode modificar a estrutura física do solo e a distribuição de poros, influenciando processos físicos e biológicos do sistema solo-planta, embora em condições distintas das de substratos em viveiro (Zhang *et al.*, 2025).

O pH do CUP aumentou linearmente com a concentração (de 5,0 para 7,4). Esse comportamento é consistente com o efeito alcalinizante do biochar descrito na literatura, o qual pode contribuir para maior disponibilidade de nutrientes no solo, conforme discutido por Ding *et al.* (2016). Também, o CUP apresentou teores

consistentes de matéria orgânica (até 71,97%) e carbono orgânico (até 35,33%), indicando uma matriz capaz de modificar o ambiente do substrato e influenciar indiretamente a atividade microbiana, principalmente por meio de alterações na estrutura física, no pH e na retenção de nutrientes (Lehmann; Joseph, 2015), conferindo ao substrato maior capacidade de retenção de nutrientes e menor lixiviação (Kammann *et al.*, 2015).

A condutividade elétrica (CE) do biochar de cupuaçu (CUP) aumentou com a dosagem, mas permaneceu dentro de níveis seguros (até cerca de 1,0 mS/cm na dose de 50 %), indicando baixo risco de salinização. De fato, estudos demonstram que biochars com condutividade elétrica inferior a 2 mS/cm não elevam significativamente a salinidade do solo e podem até reduzi-la, especialmente em solos já salinizados (Wang *et al.*, 2024).

Por outro lado, o biochar de açaí alcançou CE de 1,33 dS/m, indicando um risco potencial de estresse osmótico, pois altas concentrações salinas podem comprometer a absorção hídrica. O CUP, ao equilibrar disponibilidade iônica e segurança osmótica, se mostra vantajoso como condicionador de substratos (Chan *et al.*, 2007; Murtaza *et al.*, 2024).

A combinação de biochars em concentrações entre 10% e 30% apresentaram propriedades físico-químicas compatíveis com os critérios estabelecidos pela Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020 (Brasil, 2020), que define parâmetros mínimos para a caracterização de materiais como substratos comerciais, incluindo condutividade elétrica, pH, densidade, teor de matéria orgânica e capacidade de retenção de água. Nesse contexto, os resultados indicam a viabilidade do uso dessas formulações como componentes de substratos, do ponto de vista regulatório. Adicionalmente, a valorização de resíduos agroindustriais na produção de biochars está conceitualmente alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em especial aos ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), conforme discutido por Bueno e Torres (2022).

3.3.2 Variáveis de Crescimento Vegetativo e Qualidade das Mudas

A análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 2 para variáveis vegetativas e na Tabela 3 para biomassa e qualidade, revelou uma interação

significativa ($p < 0,05$) entre as fontes e as concentrações de biochar para as variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colo (DC), Índice de Qualidade de Dickson (IQD), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca das raízes (MSR) e massa seca total (MST). Essa interação indica que o efeito de uma fonte de biochar sobre o desenvolvimento da muda não é uniforme em todas as concentrações. De forma isolada, a fonte de biochar teve efeito significativo sobre AP, DC e a relação altura/diâmetro (RAD), enquanto as concentrações influenciaram o DC e a RAD. Contudo, o número de folhas (NF), o índice SPAD e a relação parte aérea/raiz (RPAR) não apresentaram resposta significativa aos tratamentos aplicados, sugerindo uma menor sensibilidade dessas variáveis às condições experimentais.

Estes resultados reforçam que a eficácia do biochar é multifatorial, dependendo intrinsecamente da origem da matéria-prima e da dosagem aplicada. As propriedades físico-químicas avaliadas, como pH, capacidade de troca catiônica (CTC), condutividade elétrica (CE), teor de carbono orgânico e capacidade de retenção de água, variaram de forma consistente entre os diferentes biochars e concentrações, conforme evidenciado na Tabela 1, confirmando que o biochar não constitui um insumo homogêneo. Tais atributos são amplamente reconhecidos na literatura como determinantes do potencial do biochar como condicionador de solo, embora sua magnitude dependa do material de origem e das condições de produção (Premalatha *et al.*, 2023). A persistência do biochar no ambiente edáfico, refletida nas alterações observadas em parâmetros como pH e carbono orgânico do substrato, é apontada como um fator relevante para a dinâmica química do solo e pode, em determinados sistemas, estar associada a respostas do desenvolvimento vegetal, conforme discutido por Khan *et al.* (2024a). Deluca *et al.* (2015) destacam que a heterogeneidade do biochar decorre das diferentes matérias-primas e das condições de pirólise, especialmente da temperatura, as quais influenciam suas propriedades químicas e físicas e, conseqüentemente, a dinâmica e a disponibilidade de nutrientes no solo.

Rufino (2025) também avaliou o impacto do biochar de casca de cupuaçu (CUP) e de casca da amêndoa da castanha-do-brasil (CAS), mas em interação com adubação convencional e de liberação lenta. Seus resultados indicam que a adubação convencional NPK + micronutrientes, semelhante à utilizada neste estudo, mostrou-se frequentemente mais eficiente para o crescimento e a qualidade das mudas de *E.*

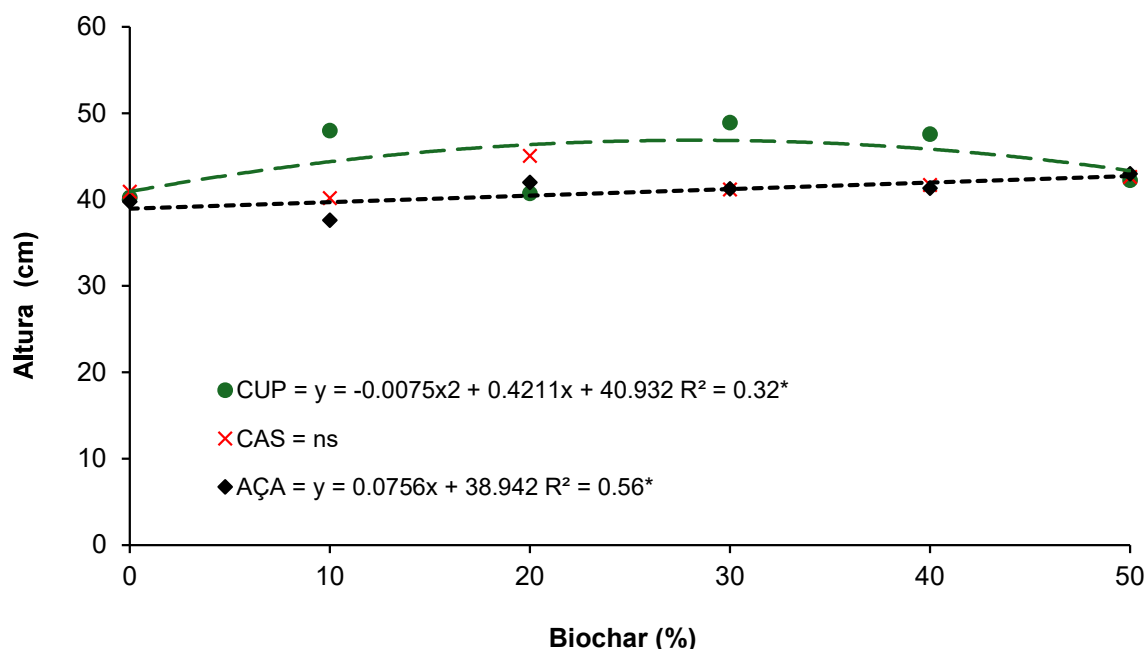
precatoria quando associada ao biochar, especialmente sob condições tropicais, reforçando a importância dessa estratégia nutricional.

Tabela 2. Resumo da análise de variância para as variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colo (DC), relação altura/diâmetro (RAD), número de folhas (NF) e índice SPAD de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes e concentrações de biochar. Rio Branco, AC, 2025

FV	GL	Quadrados médios				
		AP	DC	RAD	NF	SPAD
Bloco	2	72,42**	3,32 ^{ns}	0,18*	0,30	267,31 ^{ns}
Fonte (F)	2	68,42**	98,22**	1,10**	0,43 ^{ns}	2,51 ^{ns}
Concentração (C)	5	14,10 ^{ns}	17,79**	0,15*	0,65 ^{ns}	208,66 ^{ns}
F x C	10	26,38*	6,45**	0,07 ^{ns}	0,50 ^{ns}	316,28 ^{ns}
Erro	34	11,88	1,82	0,03	0,26	100,70
C.V. (%)	-	8,12	7,48	7,80	9,56	19,68

** e * significativo a 1% e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo.

Figura 3. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochars sobre a altura de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2025



a) Crescimento em Altura (AP)

A aplicação de biochar de diferentes fontes promoveu respostas contrastantes no crescimento em altura das mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua, conforme ilustrado

na Figura 3. O biochar de casca de cupuaçu (CUP) resultou nas maiores médias de altura, ajustando-se a um modelo quadrático com um ponto de máxima em 28,07% de concentração, atingindo 46,84 cm. Em contraste, o biochar de caroço de açaí (AÇA) apresentou uma resposta linear crescente, enquanto o biochar de casca de castanha-do-brasil (CAS) não demonstrou efeito significativo. Comparativamente, os dados da Figura 3 indicam que o CUP superou as demais fontes nas concentrações de 10% (48,00 cm), 30% (48,92 cm) e 40% (47,58 cm).

O desempenho superior do CUP pode ser diretamente correlacionado à sua rica composição nutricional, especialmente o nitrogênio, e à sua elevada capacidade de retenção de água, conforme detalhado na Tabela 1. A otimização da qualidade do solo promovida pelo biochar é um fator relevante para o desenvolvimento inicial de mudas. Revisões recentes indicam que esse material pode melhorar a retenção hídrica e favorecer a retenção e disponibilização mais equilibrada de nutrientes nos substratos, em função de suas propriedades físico-químicas, como elevada porosidade e capacidade de troca catiônica (Natalli *et al.*, 2024). Adicionalmente, Mendonça *et al.* (2024) observaram efeitos positivos do biochar de sementes de açaí sobre atributos do solo e o crescimento inicial de mudas, explicando os resultados elevados de altura com o CUP.

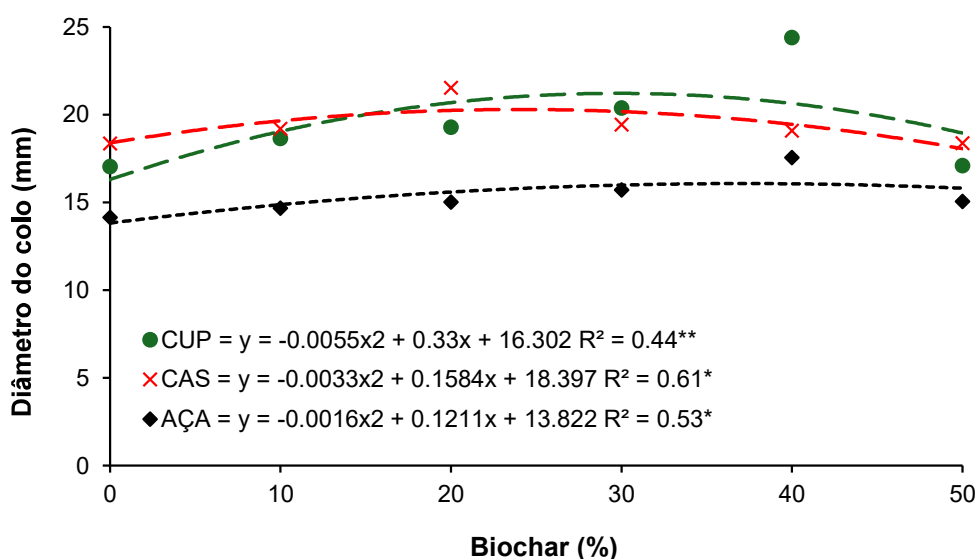
Os achados de Rufino (2025) para o açaizeiro-solteiro (*E. precatoria*) corroboram a eficiência do biochar de casca de cupuaçu na promoção do crescimento em altura das mudas, especialmente quando associado à adubação convencional. Nesse contexto, a combinação da adubação convencional com o biochar de cupuaçu resultou em crescimento linear crescente da altura das mudas, enquanto o biochar de casca da amêndoa da castanha-do-brasil (CAS), sob o mesmo manejo, apresentou ajuste quadrático, com altura máxima estimada de 29,84 cm na concentração de 23,04% de biocarvão (Rufino, 2025).

Embora a pesquisadora tenha observado valores de altura geralmente menores (máximo de 29,84 cm para CAS e tendências lineares para CUP, sem um pico explícito de 48 cm como o nosso), a resposta quadrática para o biochar de castanha e a positiva para o cupuaçu são consistentes com as tendências identificadas para *E. oleracea* neste trabalho. As diferenças nos valores absolutos podem ser atribuídas a variações na espécie (solteiro versus touceira), no genótipo, ou em outros fatores de manejo experimental.

b) Diâmetro do Colo (DC)

A análise da interação entre fontes e concentrações de biochar revelou que o CUP e o CAS proporcionaram maiores valores de diâmetro do colo (DC) em comparação ao AÇA (Figura 4). O CUP apresentou um ponto de máxima em 30,00% de concentração (21,25 mm), e o CAS em 24,00% (20,30 mm), ambos com ajuste quadrático. O AÇA, por sua vez, alcançou 16,11 mm em 37,84% de concentração, também com resposta quadrática. Os resultados da Figura 6 indicam que o CUP (24,39 mm em 40%) e o CAS (21,53 mm em 20%) foram mais eficientes na promoção do engrossamento do caule. O incremento no DC pode ser relacionado à melhoria das condições físico-químicas do substrato, como aumento da porosidade, da retenção hídrica e da capacidade de troca de nutrientes, as quais favorecem o crescimento radicular e o desenvolvimento estrutural das plantas durante a fase de estabelecimento, conforme demonstrado por Piccolo *et al.* (2022). As propriedades benéficas do CUP e CAS, como sua capacidade de retenção de água e CTC elevadas (Tabela 1), justificam sua maior eficiência no aumento do diâmetro do colo.

Figura 4. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochar sobre o diâmetro do colo de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2025

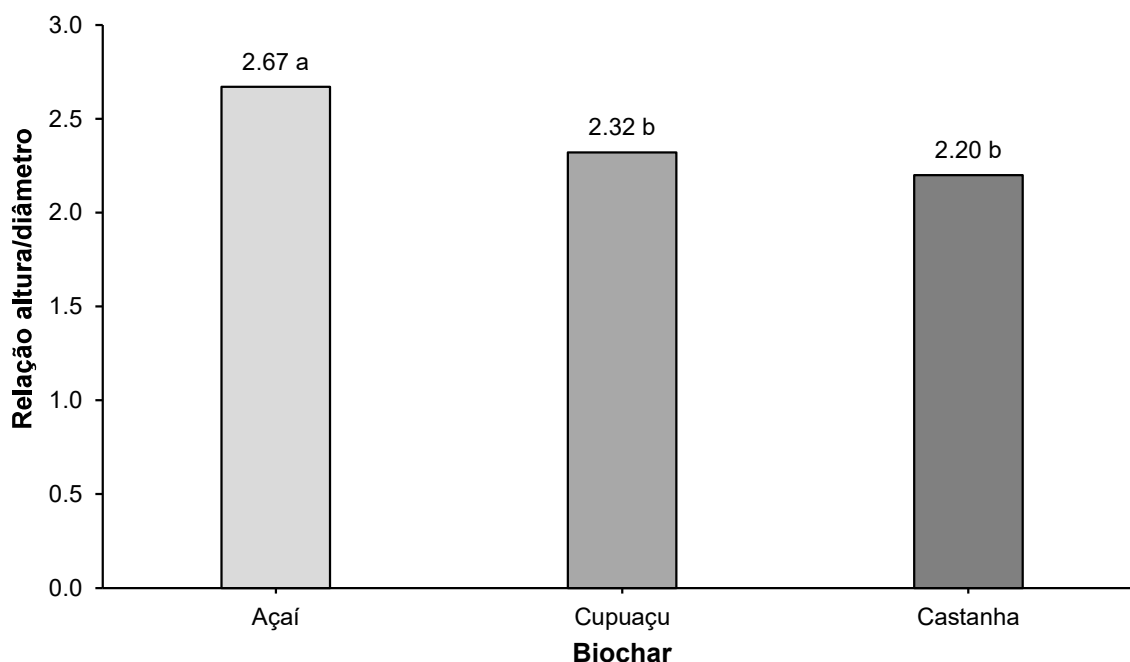


A tese de Rufino (2025) também ressalta a importância do biochar para o diâmetro do colo de *Euterpe precatoria*. Em seu estudo, o biochar de casca da amêndoa da

castanha-do-brasil (CAS), associado à adubação convencional, apresentou ajuste quadrático, com diâmetro do colo máximo estimado de 14,31 mm na concentração de 17,64% de biochar. Para o biochar de casca de cupuaçu, o diâmetro do colo também respondeu de forma não linear às concentrações, indicando a existência de níveis ótimos quando associado à adubação convencional (Rufino, 2025).

As concentrações ótimas e os padrões de resposta observados por Rufino (2025) para o diâmetro do colo de *Euterpe precatoria*, caracterizados por ajuste quadrático para o biochar de casca da amêndoa da castanha-do-brasil e respostas dependentes da concentração para o biochar de casca de cupuaçu, são notavelmente similares às tendências observadas neste trabalho para *E. oleracea*, embora os valores absolutos de diâmetro do colo tenham sido superiores no presente estudo. Essa consistência sugere que o mecanismo de ação do biochar desses resíduos agroindustriais na robustez do caule pode ser amplamente aplicável a ambas as espécies de açáí.

Figura 5. Relação altura/diâmetro de mudas de açazeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes de biochar. Rio Branco, AC, 2025

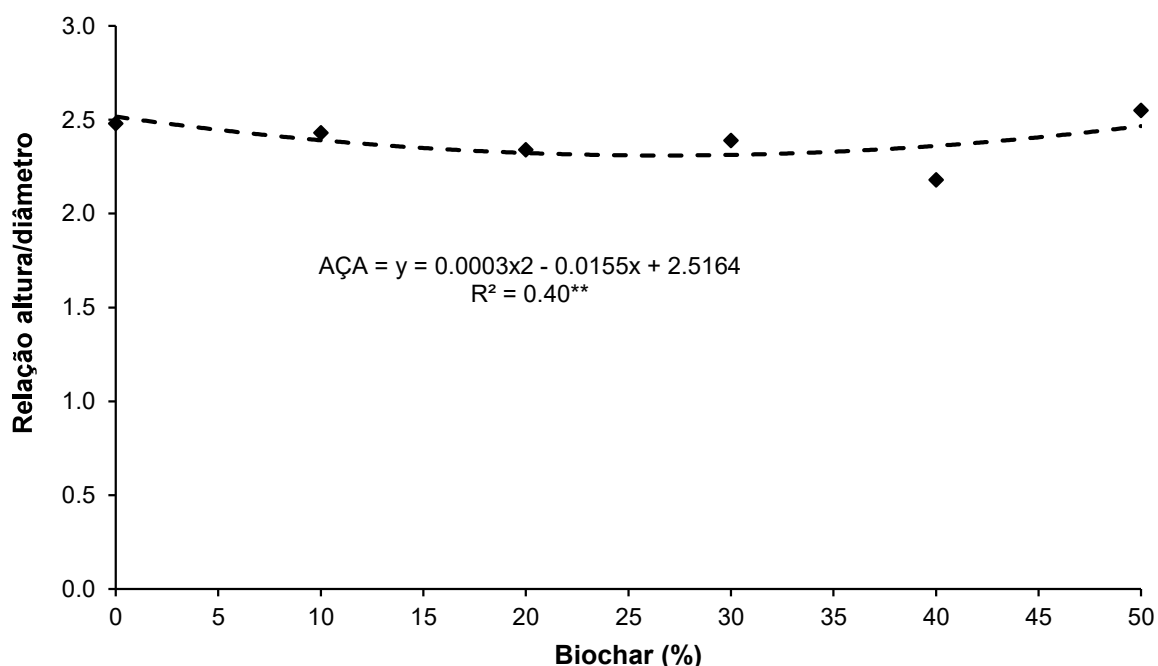


* Médias seguidas de mesma letra não diferem ($p > 0,05$) entre si pelo teste de Tukey.

c) Relação Altura/Diâmetro (RAD)

A relação altura/diâmetro (RAD), um indicador da qualidade morfológica das mudas (Dickson *et al.*, 1960), apresentou efeito significativo para a fonte de biochar de forma isolada (Tabela 2, Figura 5). O biochar de açaí (AÇA) resultou em uma RAD média superior (2,67), indicando mudas mais alongadas. Em contraste, os biochars de cupuaçu (CUP) e castanha (CAS) produziram mudas com RADs menores (2,32 e 2,20, respectivamente), sugerindo um crescimento mais equilibrado e robusto. Valores mais baixos de RAD são associados a maior resistência mecânica e maior capacidade de sobrevivência em campo (Ivetić *et al.*, 2016). A análise de regressão para as concentrações de biochar revelou um ponto de mínima em 25,83%, correspondendo a uma RAD de 2,31 (Figura 6), indicando que doses intermediárias de biochar, especialmente CUP e CAS, contribuem para a formação de mudas menos alongadas e morfológicamente mais equilibradas. Esses efeitos podem estar associados às melhorias na estrutura do substrato e na retenção hídrica promovidas pelo biochar, que favorecem o desenvolvimento radicular e o desempenho morfofisiológico das plantas, conforme discutido por Baronti *et al.* (2024).

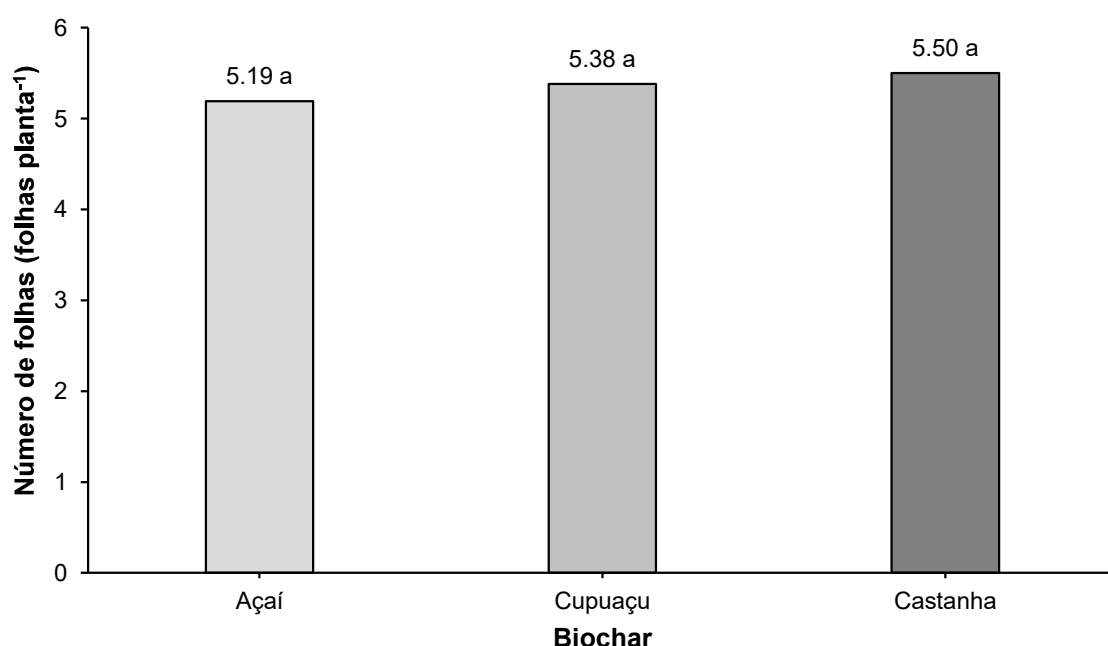
Figura 6. Relação altura/diâmetro de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de concentrações de biochar. Rio Branco, AC, 2025



d) Número de Folhas (NF) e Índice SPAD

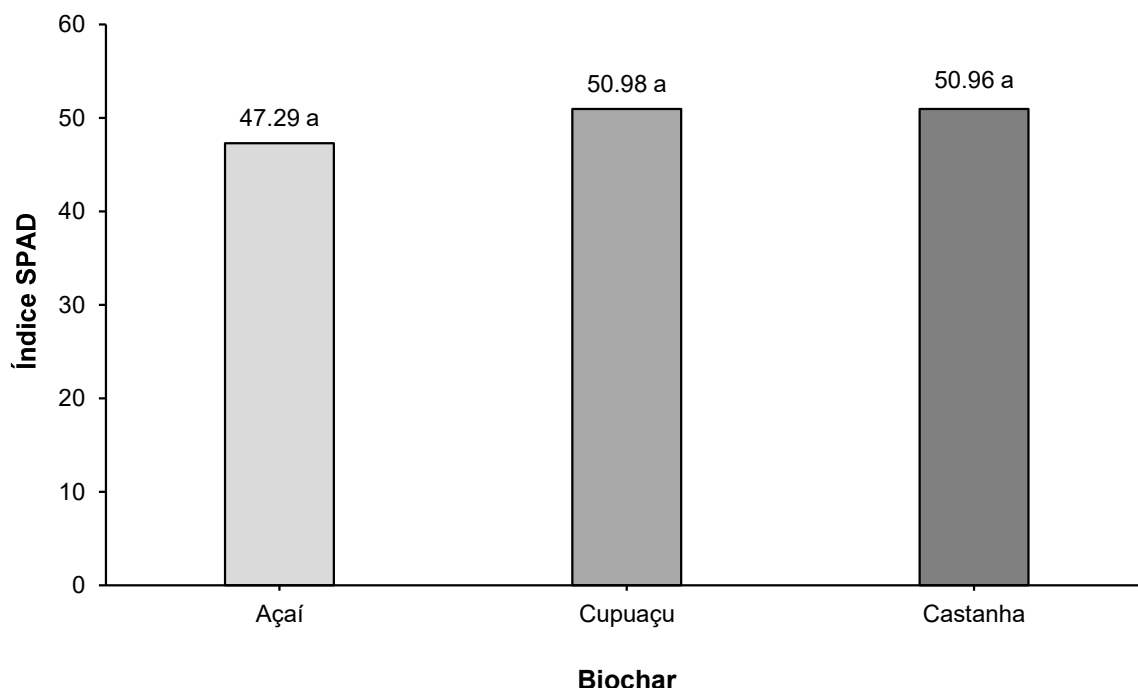
Não foram observadas diferenças significativas para o número de folhas (NF) e o índice SPAD em função das diferentes fontes de biochar (Tabela 2, Figuras 7 e 8). Esses resultados sugerem que, embora o biochar possa promover melhorias em atributos estruturais e de crescimento, seus efeitos sobre variáveis foliares e fisiológicas tendem a ser menos consistentes, podendo depender fortemente das condições experimentais, da espécie cultivada e da forma de aplicação. A ausência de um efeito significativo sobre NF é consistente com achados de Adekiya *et al.* (2025), que não observaram diferenças estatísticas no número de folhas de tomateiros com biochar. Em relação ao SPAD, Zhang, Niu e Luo (2024) indicam que, embora o biochar possa beneficiar o conteúdo de clorofila sob estresse hídrico, a resposta não é uniforme em todas as culturas ou condições. Estudos de longo prazo (Cong *et al.*, 2023) e aqueles que avaliaram diferentes profundidades de incorporação (Gaurav *et al.*, 2025) também mostram que aumentos no número de folhas e no teor de clorofila ocorrem em situações específicas, revelando que a eficácia do biochar pode depender da forma de aplicação e de fatores como espécie e manejo (Murtaza *et al.*, 2024).

Figura 7. Número de folhas de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes de biochar. Rio Branco, AC, 2025



* Médias seguidas de mesma letra não diferem ($p > 0,05$) entre si pelo teste de Tukey.

Figura 8. Índice SPAD de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes de biochar. Rio Branco, AC, 2025



Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem ($p > 0,05$) entre si pelo teste de Tukey.

A análise de variância (Tabela 3) demonstrou que as fontes e concentrações de biochar apresentaram efeitos altamente significativos sobre todas as variáveis avaliadas (MSPA, MSR, MST, RPAR e IQD), indicando que tanto o tipo quanto a quantidade de biochar influenciam diretamente o crescimento e a qualidade das mudas de açaizeiro. A interação fonte $\times$ concentração foi significativa para MSPA, MSR, MST e IQD, evidenciando que a resposta das mudas às doses depende do biochar utilizado. Apenas a RPAR não apresentou interação, sugerindo estabilidade na proporção entre parte aérea e raiz. Os coeficientes de variação foram adequados para experimentos com mudas florestais, garantindo precisão dos resultados. Esses resultados reforçam que a escolha da fonte e da concentração de biochar é determinante para a produção de mudas de açaizeiro de maior qualidade.

Tabela 3. Resumo da análise de variância para as variáveis massas secas da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST), relação parte aérea/raiz (RPAR) e índice de qualidade de Dickson (IQD) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes e concentrações de biochar. Rio Branco, AC, 2025

FV	GL	Quadrados médios				
		MSPA	MSR	MST	RPAR	IQD
Bloco	2	17,05 ^{ns}	11,56 ^{ns}	56,18 ^{ns}	0,09 ^{ns}	3,43 ^{ns}
Fontes (F)	2	628,03 ^{**}	156,12 ^{**}	1394,69 ^{**}	0,42 ^{ns}	89,50 ^{**}
Concentrações (C)	5	24,53 ^{ns}	10,43 ^{ns}	58,72 [*]	0,28 ^{ns}	7,69 [*]
F x C	10	15,47 [*]	4,83 [*]	31,90 [*]	0,08 ^{ns}	2,47 [*]
Erro	34	11,34	6,27	24,12	0,19	2,22
C.V. (%)	-	17,15	22,10	15,86	24,26	19,67

** e * significativo a 1% e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo.

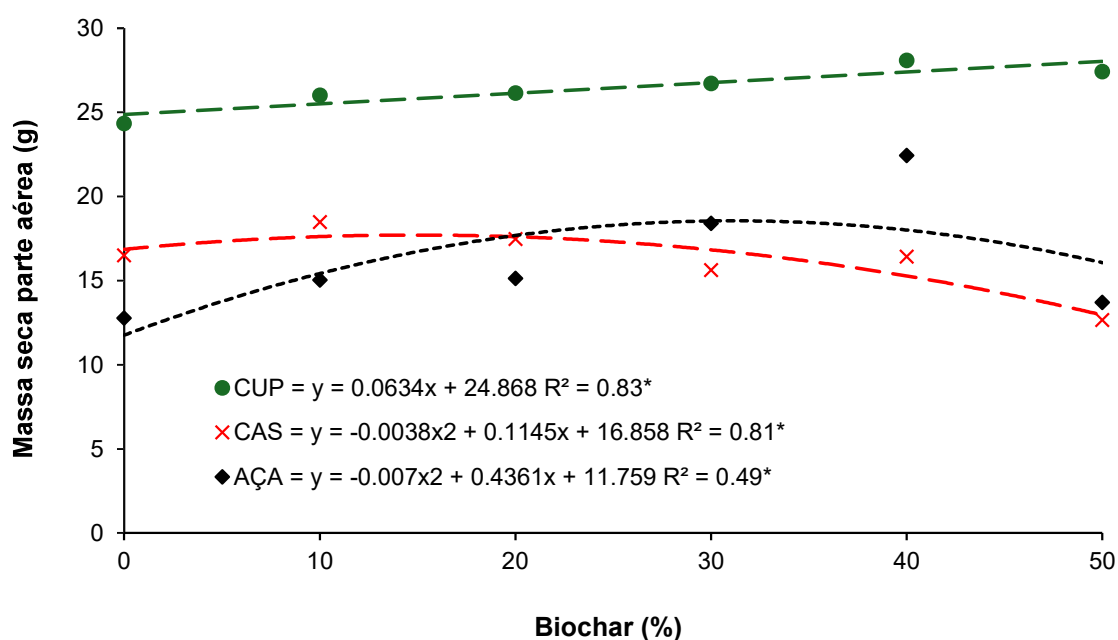
e) Massa Seca da Parte Aérea (MSPA)

O biochar de casca de cupuaçu (CUP) demonstrou desempenho superior no acúmulo de biomassa, apresentando um incremento linear ascendente para a MSPA em todas as concentrações testadas, conforme evidenciado na Figura 9. Este comportamento reflete a capacidade do CUP de fornecer nutrientes de forma contínua e eficiente, em consonância com sua rica composição nutricional apresentada na Tabela 1. Para o biochar de castanha (CAS), o ajuste quadrático indicou um ponto de máxima em aproximadamente 15% de concentração, correspondendo a 17,7 g de MSPA. Já o biochar de caroço de açaí (AÇA) apresentou um ponto ótimo em torno de 31%, com um acúmulo de 18,5 g de MSPA. O efeito quadrático observado para CAS e AÇA sugere que concentrações intermediárias são mais eficazes para o crescimento, evitando potenciais efeitos negativos em doses elevadas, como imobilização de nutrientes ou alterações de pH desfavoráveis.

A tese de Rufino (2025) para *Euterpe precatoria* também demonstrou impacto significativo do biochar sobre a massa seca da parte aérea. O biochar de casca da amêndoa da castanha-do-brasil, associado à adubação convencional, apresentou ajuste quadrático, com valor máximo de MSPA estimado em 19,74 g na concentração de 22,26% de biochar. Para o biochar de casca de cupuaçu, observou-se incremento

linear crescente da MSPA com o aumento das concentrações, quando combinado com adubação convencional. Essas tendências (quadrática para o biochar de casca da amêndoa da castanha-do-brasil e linear para o biochar de casca de cupuaçu) são muito semelhantes às observadas neste trabalho com *Euterpe oleracea*, indicando uma resposta consistente das diferentes espécies de açaí à presença desses biochars na composição do substrato. A similaridade dos resultados reforça a hipótese de que as propriedades intrínsecas do biochar de cupuaçu e de castanha, como a capacidade de retenção de água e de nutrientes, desempenham papel determinante no acúmulo de biomassa da parte aérea, com variações moduladas pelas características específicas de cada espécie.

Figura 9. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochar sobre a massa seca da parte aérea de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2025



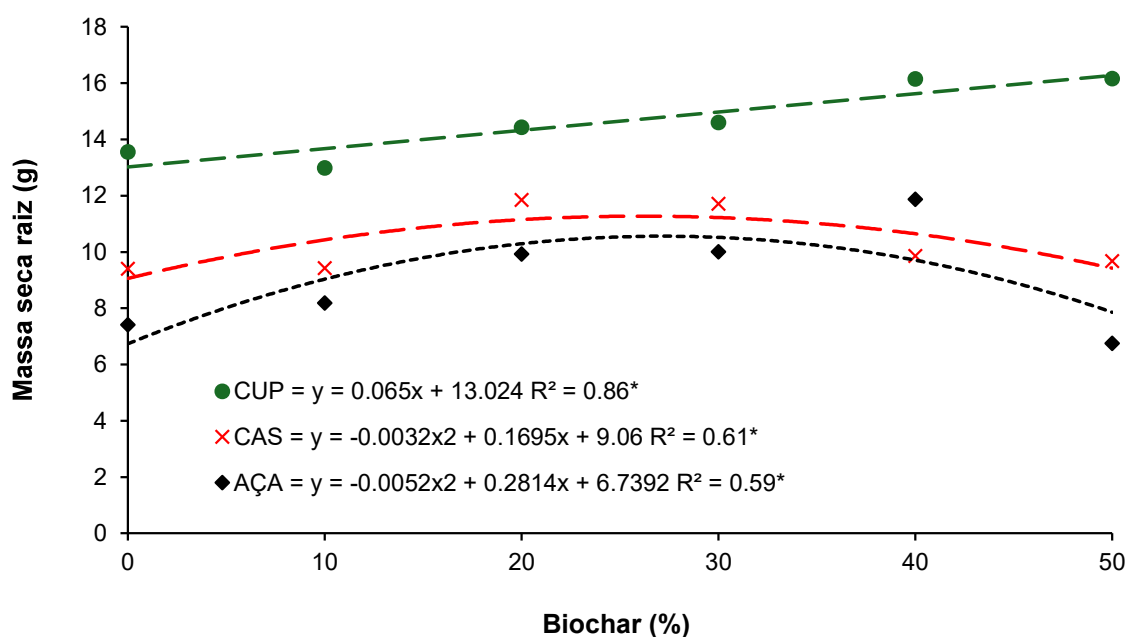
f) Massa Seca das Raízes (MSR)

O CUP também apresentou um incremento linear para a massa seca das raízes (MSR) (Figura 10), indicando uma resposta positiva e contínua com o aumento da concentração. Os biochars de CAS e AÇA exibiram comportamento quadrático, com o ajuste para CAS apontando um ponto de máxima em 26,5%, com 11,3 g de MSR, e o AÇA alcançando seu ponto ótimo em 27,1%, com 10,6 g de MSR. Estes resultados

confirmam que a origem e a dosagem do biochar influenciam significativamente o acúmulo de biomassa radicular. A melhora nas propriedades físicoquímicas dos substratos pelo CUP (Tabela 1), favorece o desenvolvimento radicular, garantindo um sistema de absorção mais robusto (Rufino, 2025).

Os dados de Rufino (2025) para *Euterpe precatoria* também evidenciaram a contribuição do biochar de casca da amêndoa da castanha-do-brasil (CAS) e de cupuaçu (CUP) para o desenvolvimento radicular. Observou-se ajuste quadrático da massa seca de raízes para o biochar CAS, com valor máximo estimado de 5,35 g na concentração de 21,48% de biochar, enquanto o biochar de casca de cupuaçu, associado à adubação convencional, promoveu incremento linear crescente da MSR. Esses padrões de resposta, quadrático para CAS e linear para CUP, são análogos aos observados neste estudo para *E. oleracea*. As propriedades associadas à melhoria da estrutura do solo, como maior porosidade e aeração (Tabela 1), favorecem condições físicas mais adequadas à penetração radicular e à absorção de água, conforme discutido para sistemas solo-planta em estudos com biochar (Frimpong *et al.*, 2025). As diferenças de magnitude nos valores de MSR (5,35 g em *E. precatoria* vs. 11,3 g em *E. oleracea* para CAS) podem refletir características intrínsecas das espécies ou otimizações de manejo.

Figura 10. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochar sobre a massa seca das raízes de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2025

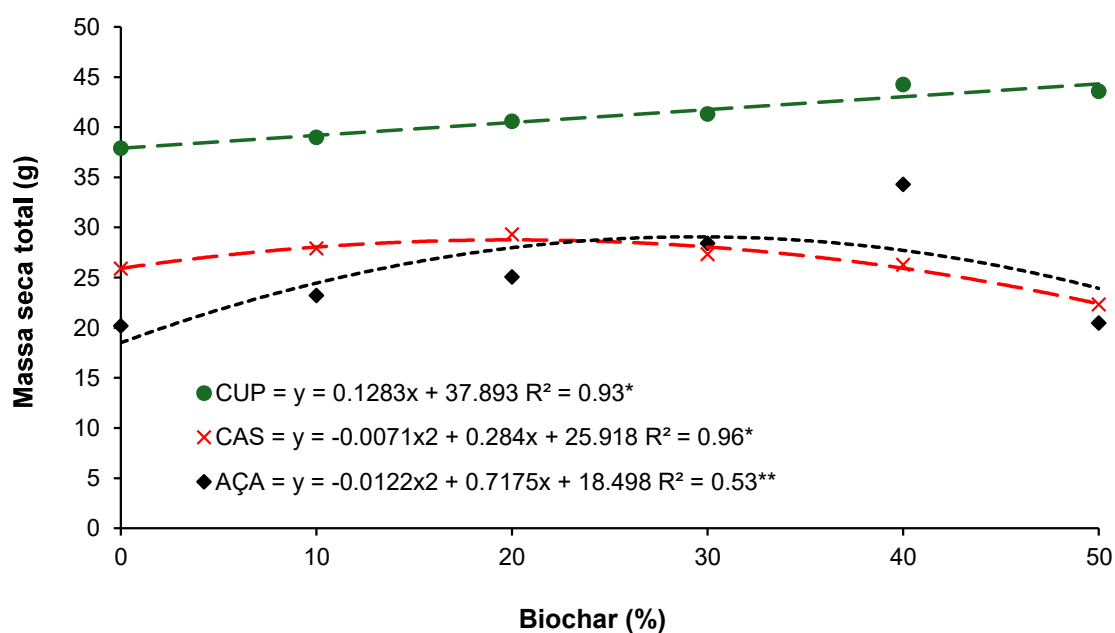


g) Massa Seca Total (MST)

Os padrões de resposta da massa seca total das mudas de açaizeiro variaram conforme a fonte de biochar (Figura 11). Para o CUP, observou-se uma curva linear crescente, demonstrando aumento contínuo da biomassa total até a dose máxima testada (50%). Esse comportamento pode estar associado à composição química rica em nutrientes e às características físicas favoráveis do material, como baixa densidade e alta porosidade, que são consideradas desejáveis para substratos (Sousa Filho *et al.*, 2025), podendo estimular o desenvolvimento radicular e a produção de biomassa.

Em contraste, o CAS apresentou resposta quadrática, com ponto de máxima em 20% (28,76 g), seguido de declínio em doses mais elevadas. O AÇA também exibiu comportamento quadrático, com ponto ótimo estimado em 29,4% (29,05 g). De modo geral, os diferentes padrões de resposta entre as fontes corroboram que as propriedades químicas e físicas do biochar variam em função da matéria-prima e das condições de pirólise, conforme amplamente discutido na literatura (Zhao *et al.*, 2024).

Figura 11. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochar sobre a massa seca total de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2025



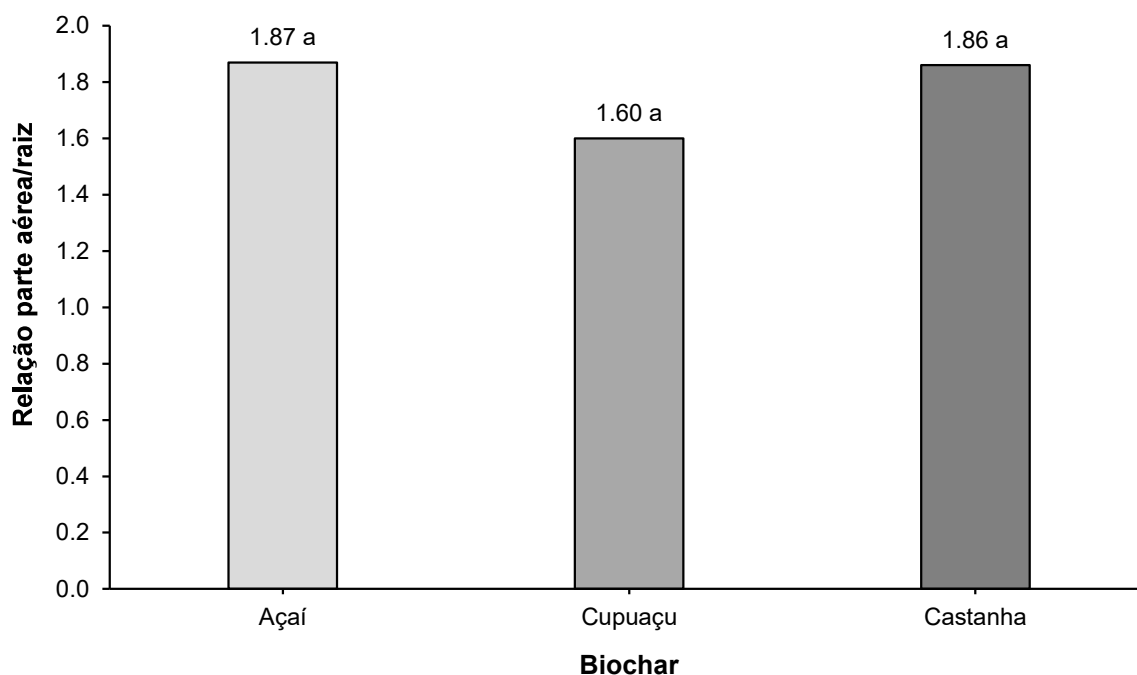
Corroborando os resultados obtidos com *Euterpe oleracea*, Rufino (2025) também observou impacto positivo do biochar sobre a massa seca total (MST) de

Euterpe precatoria. Em seu estudo, o biochar de casca da amêndoa da castanha-do-brasil, associado à adubação convencional, apresentou ajuste quadrático, com MST máxima estimada de 25,09 g na concentração de 22,07% de biocarvão. Por sua vez, o biochar de casca de cupuaçu, sob adubação convencional, promoveu incremento linear crescente da MST. A consistência desses padrões de resposta, quadrático para CAS e linear para CUP, entre as duas espécies de açaí, mesmo com valores absolutos distintos, reforça o potencial desses biochars como condicionadores de substrato. A capacidade do biochar de otimizar o fornecimento de nutrientes e a retenção hídrica, como detalhado na Tabela 1, é essencial para o acúmulo de biomassa em ambas as espécies.

h) Biomassa (MSPA, MSR, MST)

As variáveis massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca das raízes (MSR) e massa seca total (MST), bem como o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), apresentaram interação significativa entre as fontes e as concentrações de biochar (Tabela 3). Em contrapartida, a relação parte aérea/raiz (RPAR) não demonstrou efeito significativo dos tratamentos (Tabela 3, Figura 12), com uma média geral de 1,79. Essa estabilidade da RPAR indica que, independentemente da fonte ou concentração de biochar, a alocação de biomassa entre a parte aérea e o sistema radicular manteve-se proporcional e fisiologicamente adequada, sem gerar desequilíbrios morfológicos.

Figura 12. Relação parte aérea/raiz de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de fontes de biochar. Rio Branco, AC, 2025

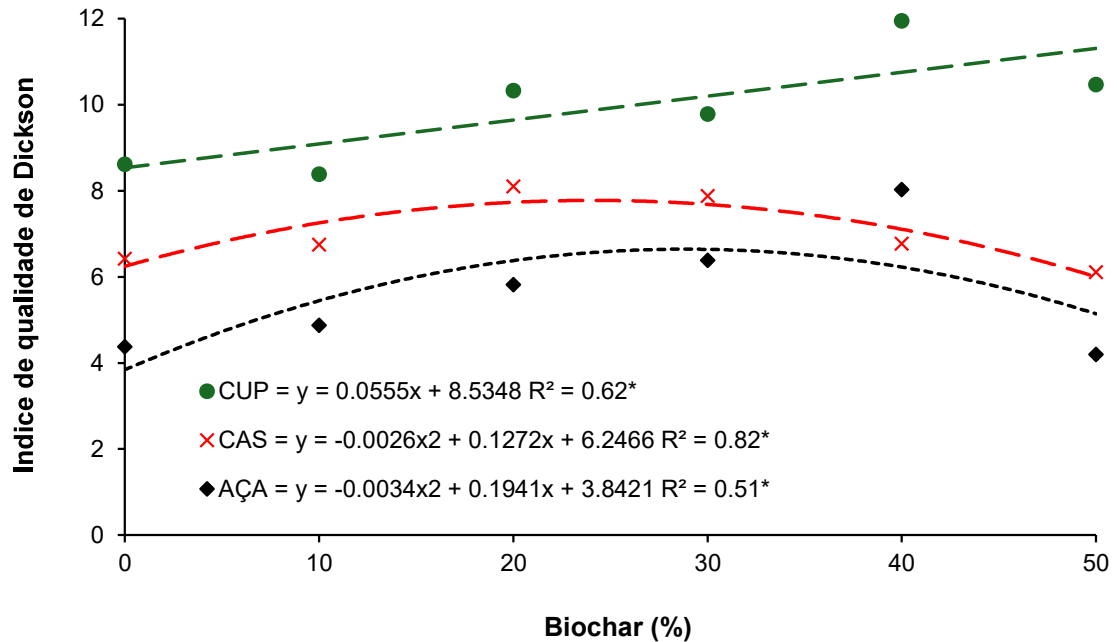


* Médias seguidas de mesma letra não diferem ($p > 0,05$) entre si pelo teste de Tukey.

i) Índice de Qualidade de Dickson (IQD)

O IQD, um indicador abrangente da qualidade das mudas (Dickson *et al.*, 1960; Alonso, Sodré e Silva, 2024), refletiu a superioridade do CUP, que apresentou uma resposta linear crescente com o aumento da concentração (Figura 13). Isso significa que, quanto mais CUP foi adicionado, melhor a qualidade geral das mudas. O CAS e o AÇA, por sua vez, exibiram respostas quadráticas, com pontos de máxima em 24,46% (IQD de 7,80) e 28,54% (IQD de 6,61), respectivamente. O CUP e o CAS demonstraram desempenho semelhante e superior ao AÇA nas concentrações iniciais (0% a 30%), mas o CUP destacou-se como a melhor alternativa a partir de 40% (12,02). As concentrações elevadas (50%) de CAS e AÇA resultaram em uma queda acentuada no IQD (Figura 13). Esse efeito pode estar associado à presença de compostos fitotóxicos ou a um excesso de alcalinidade, conforme observado por Suarez *et al.* (2023), que demonstraram efeitos negativos de hidrochar cru sobre a germinação e o crescimento de plantas, atenuados após a lavagem do material.

Figura 13. Desdobramento da interação entre fontes e concentrações de biochar sobre o Índice de Qualidade de Dickson de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2025



A tese de Rufino (2025) também avaliou o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) em mudas de *Euterpe precatoria*, cujos resultados complementam os achados do presente estudo. A autora identificou ajuste quadrático do IQD para o biochar de casca da amêndoa da castanha-do-brasil, com valor máximo estimado de 3,45 na concentração de 20,11% de biochar, quando associado à adubação convencional. Para o biochar de casca de cupuaçu, Rufino (2025) observou que o Índice de Qualidade de Dickson apresentou resposta linear crescente com o aumento da concentração de biochar, alcançando valores próximos a 3,17 na concentração de 50%.

Esses valores foram semelhantes aos obtidos com a adubação de liberação controlada, indicando desempenho comparável quanto à qualidade das mudas. A consistência nas tendências (quadrática para CAS e linear crescente para CUP) para o IQD em ambas as espécies de açaí realça a robustez da utilização desses biochars como estratégia para produzir mudas de alta qualidade. Embora os valores absolutos de IQD sejam significativamente mais elevados em neste estudo para *E. oleracea*, o padrão de resposta à concentração de biochar é similar, indicando que as propriedades do biochar de cupuaçu e castanha são eficazes na promoção de mudas robustas para o cultivo de açaí.

3.3.3 Implicações Práticas e Sustentabilidade

Este estudo evidencia o potencial do biochar como condicionador de substrato para melhorar o crescimento e a qualidade de mudas de açaizeiro. Embora os resultados com casca de cupuaçu ainda sejam recentes em termos de publicação, pesquisas demonstram que resíduos agroindustriais podem apresentar elevado potencial para produção de biochar. No caso do cupuaçu, Sousa Filho *et al.* (2025) demonstraram que resíduos de casca e semente, ainda in natura, apresentam elevado teor de nutrientes e características físicas adequadas para uso como substrato em viveiros.

As concentrações de 20% a 30% avaliadas neste estudo mostraram-se adequadas para o sistema analisado. De modo geral, revisões e meta-análises internacionais indicam que doses moderadas de biochar tendem a promover melhorias na fertilidade do solo e no desempenho das plantas, dependendo do tipo de solo, cultura e material utilizado (Ding *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2022). Além disso, o uso de biochar insere-se em estratégias de economia circular, ao possibilitar a conversão de resíduos agroindustriais em insumos de maior valor agregado, conforme discutido por Lehmann e Joseph (2015).

A manutenção da relação parte aérea/raiz (RPAR), estável (1,79) sugere que o biochar não alterou de forma negativa a alocação de biomassa. Resultados semelhantes foram observados em estudos que apontam que o biochar pode aumentar a robustez das mudas, reduzindo riscos de tombamento e melhorando a qualidade geral (Aung *et al.*, 2018).

3.4 CONCLUSÕES

O biochar de casca de cupuaçu apresentou desempenho superior como condicionador de substrato para mudas de *Eutерpe oleracea* Mart., cultivar BRS Pai d'Égua, devido à sua composição nutricional, alta retenção de água e densidade adequada.

Seu uso promoveu crescimento vegetativo significativamente maior, com incrementos em altura, diâmetro do colo e acúmulo de biomassa.

Esses efeitos resultaram em Índice de Qualidade de Dickson (IQD) elevado, indicando mudas mais robustas, vigorosas e com maior potencial de sucesso pós-plantio.

As concentrações entre 20% e 30% de biochar de casca de cupuaçu e de casca de amêndoa de castanha-do-brasil foram as mais eficientes para otimizar o desenvolvimento e o equilíbrio morfológico das mudas.

Nessas proporções, o biochar complementou a adubação convencional sem efeitos negativos sobre número de folhas, índice SPAD ou relação parte aérea/raiz, evidenciando seu potencial como insumo sustentável para viveiros amazônicos.

REFERENCIAS

- ADEKIYA, A. O.; OGUNBODE, T. O.; ESAN, V. I.; ADEDOKUN, O.; OLATUBI, I. V.; AYEGBYOIN, M. H. Short-term effects of biochar on soil chemical properties, growth and yield attributes of tomatoes. **Scientific Reports**, v. 15, p. 10411, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10411-5>. Acesso em: 24 ago. 2025.
- ALONSO, R. S.; SODRÉ, G. A.; SILVA, D. C. Dickson quality index of cocoa genotypes under water deficit. **Forests**, v. 15, n. 12, n. 2054, 2024.
- ANTONANGELO, J. A.; SUN, X.; EUFRADE-JUNIOR, H. J. Biochar impact on soil health and tree-based crops: a review. **Biochar**, v. 7, p. 51, 2025.
- AUNG, A.; HAN, S. H.; YOUN, W. B.; MENG, L.; CHO, M. S.; PARK, B. B. Biochar effects on the seedling quality of *Quercus serrata* and *Prunus sargentii* in a containerized production system. **Forest Science and Technology**, v. 14, n. 3, p. 112–118, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/21580103.2018.1471011>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- BARBOSA, J. T. de L.; RUFINO, C. P. B.; ANDRADE NETO, R. de C.; LUNZ, A. M. P.; ROCHA, A. A. da. Produção de mudas de *Euterpe precatoria* em substrato contendo diferentes proporções de biochar de caroço de açaí. In: SEMINÁRIO DA EMBRAPA ACRE DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO, 6., 2023, Rio Branco, AC. Sistemas agroalimentares sustentáveis e o futuro da Amazônia: **Anais...** Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2024. p. 47–52.
- BARONTI, S.; MONTAGNOLI, A.; BEATRICE, P.; DANIELI, A.; MAIENZA, A.; VACCARI, F. P.; CASINI, D.; DI GENNARO, S. F. Above- and below-ground morpho-physiological traits indicate that biochar is a potential peat substitute for grapevine cuttings nursery production. **Scientific Reports**, v. 14, p. 17185, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67766-4>. Acesso em: 24 ago. 2024.
- BARTLETT, M. S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 160, n. 901, p. 268–282, May 1937. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109>. Acesso em: 08 jul. 2025.
- BOSCHIERO, B. N. **Biochar ou biocarvão: o que é e qual seu potencial de uso na agricultura?** 2023. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/biochar/>>. Acesso em: 30 dez. 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020**. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos

fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Brasília, DF: Instrução Normativa SDA/MAPA 61/2020.

BUENO, A. M. C.; TORRES, D. A. P. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da agenda 2030 e bioeconomia**: oportunidades e potencialidades para atuação da Embrapa. Brasília, DF: Embrapa, 2022. 103 p.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CHAN, K. Y.; VAN ZWIETEN, L.; MESZAROS, I.; DOWNIE, A.; JOSEPH, S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. **Australian Journal of Soil Research**, v. 45, n. 8, p. 629-634, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/SR07109>. Acesso em: 25 ago. 2025.

CONG, M.; HU, Y.; SUN, X.; YAN, H.; YU, G.; TANG, G.; CHEN, S.; XU, W.; JIA, H. Long-term effects of biochar application on the growth and physiological characteristics of maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1172425>. Acesso em: 24 ago. 2024.

DELUCA, T. H.; GUNDALE, M. J.; MACKENZIE, M. D.; JONES, D. L. Biochar effects on soil nutrient transformations. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management**. 2. ed. London: Routledge, 2015. p. 421-454. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/302558326>. Acesso em: 25 ago. 2025.

DIAS, Y. N.; PEREIRA, W. V. S.; CALDEIRA, C. F.; RAMOS, S. J.; SOUZA, E. S.; RIBEIRO, P. G.; FERNANDES, A. R. Açaí seed biochar-based phosphate fertilizers for improving soil fertility and mitigating arsenic-related impacts from gold mining tailings: synthesis, characterization, and lettuce growth assessment. **Minerals**, v. 14, n. 7, p. 732, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min14070732>. Acesso em: 25 ago. 2025.

DICKSON, A.; LEAF, A.; HOSNER, J.F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forest Chronicle**, West Mattawa, v. 36, p. 10-13, 1960.

DING, Y.; LIU, Y.; LIU, S.; LI, Z.; TAN, X.; HUANG, X.; ZENG, G.; ZHOU, L.; ZHENG, B. Biochar to improve soil fertility: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, p. 8, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>. Acesso em: 25 ago. 2025.

FRIMPONG, K. A.; OWUSU, S.; DARKO, R. O.; HANYABUI, E.; ABBEY, A. N. A.; TETTEH, D. A. Effect of biochar application rates on soil properties and plant growth: the case of *Amaranthus caudatus*. **Journal of Environmental Management**, v. 3, n. 21, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00172-0>. Acesso em: 26 ago. 2025.

GAURAV, S.; DIPTANU, B.; MEHTA, C. M.; PRASANN, K.; NISHIHARA, E.; INUBUSHI, K.; SUDO, S.; HAYASHIDA, S.; PATRA, P. K.; MINKINA, T.; RAJPUT, V. D. Effects of biochar amendment at various soil depths on maize roots and growth indices. **Scientific Reports**, v. 15, n. 26310, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09218-1>. Acesso em: 26 ago. 2025.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 4, p. 219–230, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>. Acesso em: 25 ago. 2025.

IVETIĆ, V.; DEVETAKOVIĆ, J.; MAKSIMOVIĆ, Z. Initial height and diameter are equally related to survival and growth of hardwood seedlings in first year after field planting. **Reforesta**, n. 2, p. 6-21, 2016. Disponível em: <https://journal.reforestationchallenges.org/index.php/REFOR/article/view/30>. Acesso em: 25 ago. 2025.

JÚNIOR, C. D. C.; PIMENTA, A. S.; SOUZA, E. C.; PEREIRA, A. K. S.; JÚNIOR, A. F. D. Uso agrícola e florestal do biochar: estado da arte e futuras pesquisas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, e55711225999, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i2.25999.

KAMMANN, C. I.; SCHMIDT, H.-P.; MESSERSCHMIDT, N.; LINSEL, S.; STEFFENS, D.; MÜLLER, C.; KOYRO, H.-W.; CONTE, P.; JOSEPH, S. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. **Scientific Reports**, v. 5, p. 11080, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep11080>. Acesso em: 25 ago. 2025.

KHAN, S.; IRSHAD, S.; MEHMOOD, K.; HASNAIN, Z.; NAWAZ, M.; RAIS, A.; GUL, S.; WAHID, M. A.; HASHEM, A.; ABD ALLAH, E. F.; IBRAR, D. Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: a review. **Plants (Basel)**, v. 13, n. 2, p. 166, 2024b. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13020166>. Acesso em: 24 ago. 2025.

KHAN, Z.; ZHANG, K.; KHAN, M. N.; ZHU, K.; HU, L. Effects of biochar persistence on soil physiochemical properties, enzymatic activities, nutrient utilization, and crop yield in a three-year rice-rapeseed crop rotation. **European Journal of Agronomy**, v. 154, p. 127096, 2024a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127096>. Acesso em: 24 ago. 2025.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9780203762264>. Acesso em: 25 ago. 2025.

MURTAZA, G.; RIZWAN, M.; USMAN, M.; HYDER, S.; AKRAM, M. I.; DEEB, M.; ALKAHTANI, J.; ALMUNQEDHI, B. M.; HENDY, A. S.; ALI, M. R.; IQBAL, R.; HARSONOWATI, W.; RAHMAN, M. H. U.; RIZWAN, M. Biochar enhances the growth and physiological characteristics of *Medicago sativa*, *Amaranthus caudatus* and *Zea*

mays in saline soils. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 1, 2024. Disponível em: <https://bmcplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-024-04957-1>. Acesso em: 24 ago. 2024.

NATALLI, L. H.; HILLIG, E.; LOMBARDI, K. C.; GODINHO, M.; NUÑEZ, R. P. Use of biochar as a component of substrates in horticulture and forestry: a review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, e0240027, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240027>. Acesso em: 24 ago. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. 2015. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2025.

PESSOA, J. D. C.; ARDUIN, M.; MARTINS, M. A.; CARVALHO, J. E. U. Characterization of Açaí (*E. oleracea*) Fruits and its Processing Residues. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 53, n. 6, p. 1451-1460, nov./dez. 2010. Acesso em: 1 dez. 2025.

PICCOLO, E. L.; BECAGLI, M.; LAURIA, G.; CANTINI, V.; CECCANTI, C.; CARDELLI, R.; MASSAI, R.; REMORINI, D.; GUIDI, L.; LANDI, M. Biochar as a soil amendment in the tree establishment phase: what are the consequences for tree physiology, soil quality and carbon sequestration? **Science of The Total Environment**, v. 844, p. 157175, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157175>. Acesso em: 24 ago. 2024.

PREMALATHA, R. P.; BINDU, J. P.; NIVETHA, E.; MALARVIZHI, P.; MANORAMA, K.; PARAMESWARI, E.; DAVAMANI, V. A review on biochar's effect on soil properties and crop productivity. **Frontiers in Energy Research**, v. 11, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2023.1092637/full>. Acesso em: 24 ago. 2024.

RODRIGUES, F. Q. **Restauração florestal na Amazônia: caminhos, oportunidades e contingências**. Manaus: Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia (IDESAM); Impact Hub Manaus, 2022.

Rstudio TEAM. **RStudio: Integrated Development Environment for R**. Boston: Posit Software, PBC, 2024. Disponível em: <https://www.rstudio.com/>. Acesso em: 25 ago. 2025.

RUFINO, C. P. B. **Biocarvão na composição de substrato e adubação para a produção de mudas de açaizeiro-solteiro**. 2025. 84 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2025.

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; MOONEY, S. J.; CLARKE, M.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F. Biochar as a sustainable alternative to açaí

waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 36-46, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.001>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SCHÄFER, G.; SOUZA, P. V. D.; KOLLER, O. C.; SCHWARZ, S. F. Propriedades físicas de substratos utilizados na produção de plantas ornamentais. **Revista Brasileira de Horticultura Ornamental**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 109–115, 2015.

SHAPIRO, S. S. An analysis of variance test for normality (Complete Samples). **Biometrika**, Oxford, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, Dez. 1965. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2333709>. Acesso em: 08 jul. 2025.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. Ames: Iowa State University Press, 1948. 503 p.

SOUSA FILHO, I. M. R. D.; SANTOS, C. A. A. D.; PAULINO, G. D. S.; ARAÚJO, A. J. C.; SOUSA, W. L. D.; ALVES, H. D. S.; VIEIRA, T. A.; LUSTOSA, D. C. Characterization of *Cupuaçu* (*Theobroma grandiflorum*) waste for substrate in seedling production. **Agriculture**, v. 15, p. 870, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15080870>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SUAREZ, E.; TOBAJAS, M.; MOHEDANO, A. F.; REGUERA, M.; ESTEBAN, E.; DE LA RUBIA, A. Effect of garden and park waste hydrochar and biochar in soil application: a comparative study. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 18, p. 16479-16493, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03036-9>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SUN, Z.; HU, Y.; SHI, L.; LI, G.; PANG, Z.; LIU, S.; CHEN, Y.; JIA, B. Effects of biochar on soil chemical properties: a global meta-analysis of agricultural soil. **Plant, Soil and Environment**, v. 68, p. 272–289, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.17221/522/2021-PSE>. Acesso em: 25 ago. 2025.

TUKEY, J. W. Comparing individual means in the analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v. 5, n. 2, p. 99-114, Jun. 1949. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/3001913>. Acesso em: 08 jul. 2025.

UCHÔA, W. S.; SANTOS NETO, J. E.; SOUZA, E. M.; SANTOS, D. M.; SOARES, N. C.; JOSÉ, J. V. Classificação climática de Köppen no estado do Acre. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS NA AMAZÔNIA SUL OCIDENTAL, 3., 2024, Cruzeiro do Sul. **Anais...** Cruzeiro do Sul: Universidade Federal do Acre – Campus Floresta, 2024. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/iiscaamazonia/843524-classificacao-climatica-de-koppen-no-estado-do-acre>. Acesso em: 25 ago. 2025.

VIÉGAS, I. J. M.; GONÇALVES, A. A. S.; FRAZÃO, D. A. C.; CONCEIÇÃO, H. E. O. Efeitos das omissões de macronutrientes e boro na sintomatologia e crescimento em plantas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.). **Revista de Ciências Agrárias**, Belém,

PA, n. 50, p. 129-141, jul./dez. 2008. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1093391>. Acesso em: 25 ago. 2025.

WANG, X.; DING, J.; HAN, L.; TAN, J.; GE, X.; NAN, Q. Biochar addition reduces salinity in salt-affected soils with no impact on soil pH: a meta-analysis. **Geoderma**, v. 443, p. 116845, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116845>. Acesso em: 25 ago. 2025.

ZHANG, W.; NIU, W.; LUO, H. Effect of biochar amendment on the growth and photosynthetic traits of plants under drought stress: a meta-analysis. *Agronomy*, v. 14, n. 12, p. 2952, 2024.

ZHANG, Y.; YAN, C.; WANG, T.; ZHANG, G.; BAHN, M.; MO, F.; HAN, J. Biochar strategy for long-term N₂O emission reduction: insights into soil physical structure and microbial interaction. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 202, p. 109685, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109685>. Acesso em: 25 ago. 2025.

ZHAO, B.; YAO, P.; WEI, Q.; BIANCHI, T. S.; WATTS, E. G.; WANG, B.; YU, Z. Effects of seasonal deposition-erosion cycle on sedimentary organic carbon remineralization and oxygen consumption in a large-river delta-front estuary. **Science of The Total Environment**, v. 916, p. 170377, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170377>. Acesso em: 25 ago. 2025.

4 CAPÍTULO II

SINERGIA ENTRE BIOCHAR DE CASCA DE CUPUAÇU E ADUBAÇÕES NA PERFORMANCE DE MUDAS DE AÇAIZEIRO

RESUMO

A produção de mudas de qualidade é determinante para o sucesso de sistemas perenes, e o uso de biochar surge como alternativa sustentável para substratos. Nesse contexto, avaliar fontes e doses de biochar pode contribuir para a melhoria de mudas de espécies florestais de importância econômica, como o açaizeiro. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar o efeito de concentrações crescentes de biochar de casca de cupuaçu, associado a diferentes fontes de adubação, sobre características morfológicas, fisiológicas e o índice de qualidade de Dickson (IQD) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua, em condições de viveiro. Para isso, o experimento foi conduzido no viveiro da Embrapa Acre, em Rio Branco, entre março e dezembro de 2023, em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 6×3 . Os tratamentos consistiram em cinco concentrações de biochar (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) e testemunha (0%), combinadas com três fontes de adubação: sem adubação (testemunha), e adubação convencional (NPK + micronutrientes). Foram avaliadas variáveis morfológicas (altura, diâmetro do colo, número de folhas, índice SPAD e relação altura/diâmetro), biomassa (massa seca da parte aérea, radicular e total, além da relação parte aérea/raiz) e o IQD. Os resultados evidenciam interação significativa entre biochar e fontes de adubação para altura, diâmetro, número de folhas, índice SPAD, biomassa e IQD. Na adubação convencional, altura e diâmetro apresentaram respostas quadráticas, com máximos em torno de 28–30% de biochar, enquanto no FLC as respostas foram lineares crescentes. A biomassa aérea, radicular e total cresceu continuamente na adubação convencional, mas apresentou ganhos menores no FLC e efeito limitado na testemunha. A relação parte aérea/raiz permaneceu estável, e o IQD aumentou linearmente com o biochar na adubação convencional. Os incrementos médios mensais em altura e diâmetro foram mais expressivos entre o sétimo e oitavo mês, sobretudo nas doses de 10%, 30% e 40% de biochar combinadas à adubação convencional. Conclui-se que o biochar de casca de cupuaçu melhora significativamente a qualidade de mudas de açaizeiro quando associado à adubação convencional, promovendo maior vigor, equilíbrio morfológico e potencial de sobrevivência em campo.

Palavras-chave: *Euterpe oleracea* Mart. Biocarvão. Adubação convencional e controlada. Qualidade de mudas

ABSTRACT

The production of high-quality seedlings is crucial for the success of perennial systems, and the use of biochar emerges as a sustainable alternative for substrates. In this context, evaluating sources and doses of biochar can contribute to improving seedlings of forest species of economic importance, such as açai palm. Thus, the objective of this study is to evaluate the effect of increasing concentrations of cupuaçu shell biochar, associated with different fertilization sources, on morphological and physiological traits and the Dickson Quality Index (DQI) of BRS Pai d'Égua açai palm seedlings under nursery conditions. The experiment was conducted at the Embrapa Acre nursery, in Rio Branco, between March and December 2023, in a randomized block design with a 6 × 3 factorial scheme. Treatments consisted of six concentrations of biochar (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%) combined with three fertilization sources: control (no fertilization), controlled-release fertilizer (CRF), and conventional fertilization (NPK + micronutrients). Morphological variables (plant height, stem diameter, number of leaves, SPAD index, and height/diameter ratio), biomass (shoot, root, and total dry mass, as well as shoot/root ratio), and DQI were evaluated. Results showed significant interaction between biochar and fertilization sources for height, diameter, number of leaves, SPAD index, biomass, and DQI. Under conventional fertilization, height and diameter exhibited quadratic responses, with maximum values at around 28–30% biochar, whereas CRF showed linear increases. Shoot, root, and total biomass increased continuously under conventional fertilization but showed smaller gains under CRF and limited effects in the control. The shoot/root ratio remained stable, and DQI increased linearly with biochar under conventional fertilization. Monthly increments in height and diameter were most expressive between the seventh and eighth month, especially at 10%, 30%, and 40% biochar combined with conventional fertilization. It is concluded that cupuaçu shell biochar significantly improves the quality of açai palm seedlings when associated with conventional fertilization, promoting greater vigor, morphological balance, and potential for field survival.

Keywords: *Euterpe oleracea* Mart. Biochar. Conventional and controlled fertilization. Seedling quality.

4.1 INTRODUÇÃO

A produção de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) de alta qualidade constitui etapa essencial para o êxito de sistemas agroflorestais e agroindustriais na Amazônia, demandando substratos que conciliem sustentabilidade e eficiência produtiva. Entre as alternativas disponíveis, o biochar tem se destacado como condicionador de substratos, devido à sua capacidade de melhorar atributos físicos e químicos, como a estrutura, a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes essenciais (Agarwal *et al.*, 2022). Tais características conferem ao insumo um papel estratégico em ambientes tropicais, nos quais as limitações edáficas frequentemente comprometem o desempenho inicial das mudas.

Resíduos agroindustriais amazônicos, como a casca de cupuaçu e a semente de açaí, apresentam elevado potencial para a produção de biochar, promovendo a economia circular e agregando valor a matérias-primas regionais que, em geral, são descartadas. De forma semelhante, Dias *et al.* (2024) demonstraram que o biochar de semente de açaí enriquecido com fósforo atuou como fertilizante fosfatado, aumentando a fertilidade do solo e reduzindo a absorção de arsênio por plantas de alface cultivadas em solos contaminados por rejeitos de mineração na Amazônia oriental.

Estudos evidenciam o potencial do biochar de casca de cupuaçu como condicionador de substrato para mudas de açaizeiro. Embora estudos recentes tenham demonstrado que resíduos de cupuaçu in natura apresentam elevado teor de nutrientes e características físicas favoráveis ao uso como substrato (Sousa Filho *et al.*, 2025), o potencial desses resíduos para produção de biochar e sua aplicação na propagação de espécies amazônicas ainda demanda investigações específicas.

Paralelamente, a adubação convencional, à base de NPK e micronutrientes, permanece fundamental para suprir as demandas nutricionais no cultivo de mudas. Contudo, sua eficiência pode ser limitada em substratos de baixa capacidade de retenção de água e em condições de elevada pluviosidade ou irrigação intensiva, devido a perdas por lixiviação e volatilização. Essas restrições têm estimulado a busca por tecnologias complementares que aumentem a eficiência no uso de fertilizantes e mitiguem impactos ambientais (Hedley, 2015; Araújo *et al.*, 2019).

Nesse sentido, os fertilizantes de liberação controlada (FLC) vêm ganhando destaque, pois liberam nutrientes de forma gradual, ajustando-se às exigências fisiológicas das plantas e reduzindo a frequência de aplicações. Banik *et al.* (2023)

observaram que fertilizantes nitrogenados de liberação lenta à base de biochar aumentaram a biomassa do milho, evidenciando maior eficiência de recuperação do nitrogênio. De modo semelhante, Liao *et al.* (2020) verificaram aumento no rendimento da canola (*Brassica napus* L.) e maior eficiência no uso do nitrogênio com a aplicação de fertilizantes nitrogenados de liberação controlada associados ao biochar, evidenciando o potencial dessa interação para melhorar o desempenho agrônômico e a eficiência do uso de N.

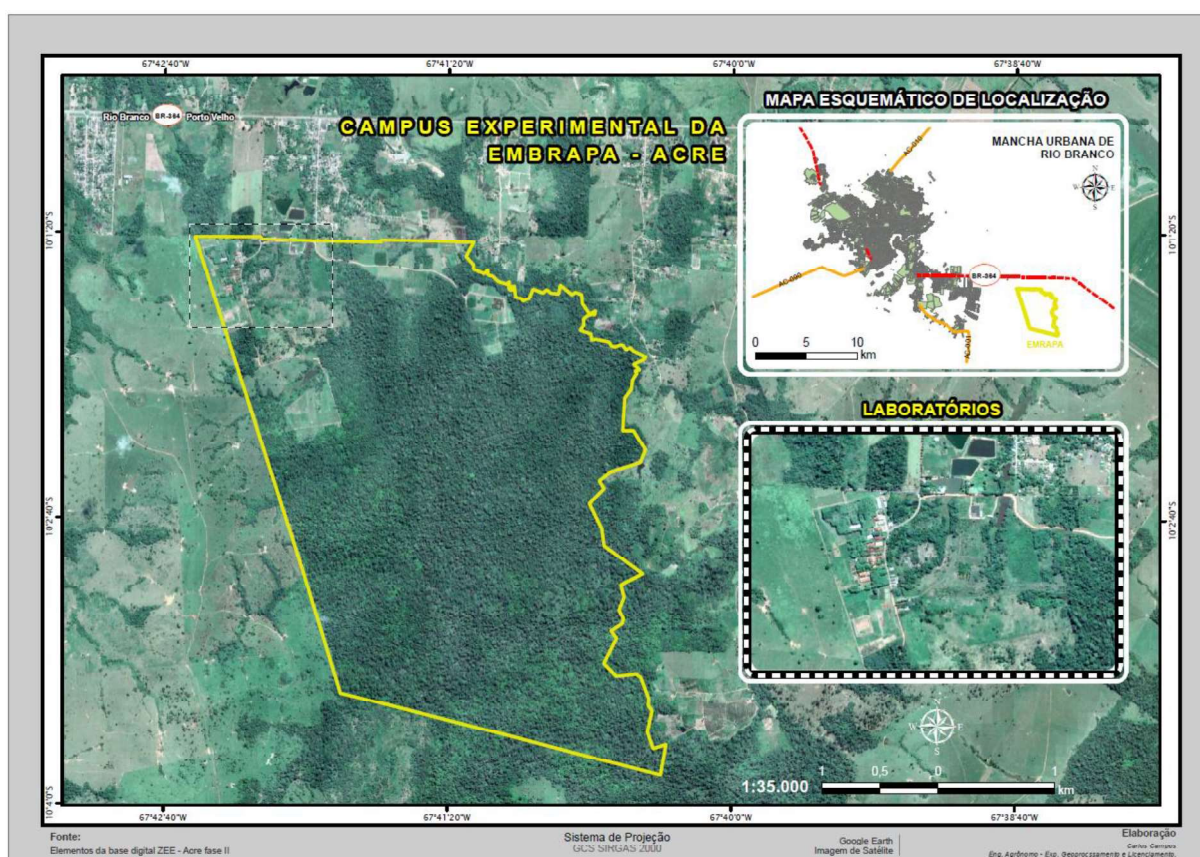
A sobreposição dos benefícios do biochar de casca de cupuaçu com a eficiência dos FLCs pode representar uma estratégia sinérgica ainda pouco explorada para a produção de mudas de açaizeiro. Enquanto o biochar contribui para a melhoria estrutural e nutricional do substrato, os FLCs garantem o suprimento contínuo de nutrientes, reduzindo custos operacionais e riscos de impactos ambientais (Ferreira *et al.*, 2024). Essa integração é especialmente relevante para viveiros amazônicos, nos quais há necessidade de soluções tecnológicas que conciliem eficiência agrônômica e sustentabilidade.

Assim, esta pesquisa justifica-se pela necessidade de desenvolver sistemas de fertilização mais eficientes e ambientalmente responsáveis para viveiros na Amazônia, aliando o aproveitamento de resíduos locais a tecnologias avançadas de manejo nutricional. Diante desse cenário, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de concentrações crescentes de biochar de casca de cupuaçu, em associação à adubação convencional e a fertilizantes de liberação controlada, sobre as características morfológicas, fisiológicas e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em condições de viveiro.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no viveiro de produção de mudas da Embrapa Acre (Figura 14), localizado na BR-364, Km 14, em Rio Branco, Acre, Brasil ($10^{\circ}01'25,95''$ S e $67^{\circ}42'04,71''$ O), entre março e dezembro de 2023. O clima da região é classificado como Am, segundo Köppen, caracterizado por monções tropicais, em que a precipitação do mês mais seco corresponde a pelo menos 25% da precipitação do mês mais úmido, com temperaturas médias mensais sempre superiores a 18°C (Uchoa *et al.*, 2024).

Figura 14. Localização do campo experimental da Embrapa Acre, Rio Branco – AC (Fonte: ZEE – Acre Fase II. Elaborado por Carlos Alberto Campos, 2023)



O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC), constituído por três blocos, em esquema fatorial 6×3 . Os tratamentos corresponderam a seis proporções de biochar de casca de cupuaçu (0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%), combinadas com três tipos de adubação: testemunha (sem

adubação), e adubação convencional (NPK + micronutrientes). O total foi de 54 unidades experimentais, cada uma composta por quatro plantas.

As sementes de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart., cultivar BRS Pai d'Égua) foram adquiridas da empresa Amazonflora, localizada em Marituba, PA, registrada no Renasem sob o número PA-00221/2007. Cada embalagem de 1 kg continha cerca de 850 sementes, sendo 70% pré-germinadas e 30% em substrato umedecido, com poder germinativo de 85% e validade de 45 dias.

Inicialmente, as sementes foram semeadas em bandejas contendo vermiculita expandida e mantidas em sala de germinação com controle de temperatura e luminosidade, no Laboratório de Sementes Florestais (Lasfac) do Parque Zoobotânico da Universidade Federal do Acre (UFAC), em Rio Branco. Após 42 dias, as plântulas em estágio de “ponto palito” foram transplantadas para tubetes de 900 mL, acondicionados em bandejas de quatro células, posicionadas em bancadas de ferro a 1,20 m do solo, em viveiro telado coberto com sombrite de 50%, na Embrapa Acre (Figura 15).

Figura 15. Mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) da cultivar BRS Pai d'Égua em tubetes de 900 mL durante o período experimental, no viveiro da Embrapa Acre, Rio Branco – AC (2023)



Foto: Andréa Alechandre

O biochar de casca de cupuaçu foi produzido a partir de resíduos agroindustriais provenientes do beneficiamento de polpa, coletados nos municípios de Rio Branco e Plácido de Castro. A pirólise foi realizada em forno artesanal (Figura 16), baseado em modelos tradicionais utilizados por agricultores locais, sob temperaturas de 250 a 350 °C, durante cerca de 10 horas, em ambiente de fluxo restrito de oxigênio. Após a carbonização, o material foi resfriado, triturado e peneirado para posterior incorporação aos substratos experimentais.

Figura 16. Forno artesanal utilizado na pirólise de casca de cupuaçu para a produção de biochar, em Rio Branco – AC (2023)



Foto: Paula Rufino

O substrato base utilizado em todos os tratamentos foi o comercial, composto por 85% de casca de pinus compostada, 10% de vermiculita e 5% de casca de arroz carbonizada, aditivado com NPK. Esse substrato apresentava condutividade elétrica de $0,50 \pm 0,30 \text{ mS.cm}^{-1}$, pH de $6,0 \pm 0,5$, umidade máxima de 58%, capacidade de retenção de água de 90% e densidade de 310 kg.m^{-1} .

A adubação convencional foi realizada em cobertura, quinzenalmente, a partir da completa expansão da primeira folha da plântula. Aplicou-se 0,31 g do formulado NPK + micronutrientes por tubete, equivalente a 344 g.m^{-3} de substrato. Este formulado foi obtido pela mistura de ureia (45% N), superfosfato simples (18% P_2O_5),

superfosfato triplo (46% P_2O_5), cloreto de potássio (60% K_2O) e sulfato de magnésio (1% K_2O ; 11,8% S; 9% Mg). Os micronutrientes foram fornecidos via FTE BR 12 (3,9% S; 1,8% B; 0,85% Cu; 2% Mn). As concentrações desses componentes foram balanceadas para mimetizar a formulação do fertilizante de liberação controlada Basacote® Plus 12M, cuja composição inclui 15% de nitrogênio total (7% nítrico e 8% amoniacal); 8% de P_2O_5 (5,6% solúvel em água); 12% de K_2O totalmente solúvel; 2% de MgO (1,4% solúvel); 5% de SO_3 (4% solúvel em água); e micronutrientes essenciais: 0,02% B, 0,05% Cu, 0,40% Fe (0,15% quelatado por EDTA), 0,06% Mn, 0,015% Mo e 0,02% Zn.

O manejo no viveiro consistiu em irrigação automática, programada para três irrigações diárias de 5 a 6 minutos cada. Semanalmente foi aplicado fungicida para controle preventivo de antracnose, enquanto adubações quinzenais de 0,31 g de NPK + micronutrientes por tubete foram realizadas nos tratamentos correspondentes. O controle de plantas espontâneas foi feito manualmente sempre que necessário.

As avaliações das mudas ocorreram em cinco períodos, a partir de dois meses após a implantação. As variáveis morfológicas avaliadas incluíram altura da planta, diâmetro do colo, número de folhas, índice SPAD e a relação altura/diâmetro. A altura foi determinada pela distância entre o nível do substrato e o ápice da muda, enquanto o diâmetro do colo foi mensurado na região do coleto, caracterizando a robustez estrutural. O número de folhas correspondeu à contagem de folhas plenamente expandidas, e o índice SPAD forneceu uma estimativa indireta do teor relativo de clorofila, refletindo o estado nutricional da muda. A relação altura/diâmetro permitiu avaliar o equilíbrio morfológico e identificar possíveis indícios de estiolamento.

As variáveis de biomassa compreenderam a massa seca da parte aérea, a massa seca da raiz e a massa seca total, obtidas após secagem das amostras em estufa a 65 °C até peso constante, além da relação parte aérea/raiz, que expressa o padrão de alocação de biomassa entre os compartimentos. A qualidade das mudas foi estimada pelo Índice de Qualidade de Dickson (IQD), calculado conforme Dickson *et al.* (1960), o qual integra parâmetros morfológicos e de biomassa para fornecer uma medida abrangente da qualidade final das mudas.

O incremento médio mensal (IMM) em altura e diâmetro do colo foi calculado com base em avaliações realizadas aos 2, 4, 6, 8 e 10 meses após a repicagem, considerando-se quatro períodos de análise. A estimativa foi obtida pela fórmula $IMM = (V_{i+1} - V_i) / \Delta t$, em que V_i corresponde ao valor da variável na avaliação inicial, V_{i+1}

ao valor na avaliação seguinte e Δt ao intervalo de tempo entre avaliações, em meses (Hunt, 1982). Esse procedimento possibilitou acompanhar a evolução do crescimento das mudas ao longo do período experimental, fornecendo estimativas consistentes de ganho médio mensal.

Os dados obtidos foram submetidos inicialmente ao teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk, 1965) e ao teste de homogeneidade das variâncias (Bartlett, 1937). Quando atendidos os pressupostos, realizou-se análise de variância (ANOVA) e, diante de significância pelo teste F de Snedecor e Cochran (1948), aplicou-se análise de regressão para os efeitos das concentrações de biochar. As comparações de médias entre os tipos de adubação foram feitas pelo teste de Tukey (1974), enquanto os incrementos foram ajustados por regressão e agrupados pelo teste de Scott-Knott (1949). Todas as análises foram realizadas ao nível de 5% de significância, utilizando-se o software RStudio (RStudio Team, 2024).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Capítulo 2 analisa a sinergia entre o biochar de casca de cupuaçu (CUP) e diferentes regimes de adubação sobre o desempenho de mudas de açaizeiro, considerando que, no Capítulo 1, esse biochar apresentou maior eficiência em relação aos demais materiais avaliados. A adequada interpretação dos resultados apresentados no item 4.4 requer a correlação direta com as características físico-químicas do CUP descritas na Tabela 1 do Capítulo 1. Propriedades como o elevado teor de nutrientes, a capacidade de retenção de água (CRA), a capacidade de troca catiônica (CTC), o pH e a condutividade elétrica (CE) do CUP são determinantes para explicar as respostas observadas nas variáveis morfológicas, fisiológicas e de biomassa das mudas.

4.3.1 Crescimento vegetativo

A Tabela 4 revela interações significativas ($p < 0,05$) entre as concentrações de biochar de casca de cupuaçu e os tipos de adubação para altura da planta (AP), diâmetro do colo (DC), número de folhas (NF) e índice SPAD. Esta interação indica que o efeito do CUP não é isolado, mas é modulado pela presença e pelo tipo de adubação, confirmando uma sinergia que maximiza ou atenua seus benefícios. A relação altura/diâmetro (RAD), contudo, foi influenciada de forma independente por cada fator.

Tabela 4. Resumo da análise de variância para as variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colo (DC), relação altura/diâmetro (RAD), número de folhas (NF) e índice SPAD de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação. Rio Branco, AC, 2024

FV	GL	Quadrados médios				
		AP	DC	RAD	NF	SPAD
Bloco	2	14,98 ^{ns}	2,11 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,64 ^{**}	137,85 ^{ns}
Concentração (C)	5	13,90 ^{ns}	5,24 ^{**}	0,16 [*]	1,92 ^{**}	191,16 [*]
Adubação (A)	2	4.057,30 ^{**}	905,85 ^{**}	2,25 ^{**}	27,43 ^{**}	5.535,51 ^{**}
C x A	10	40,59 ^{**}	11,01 ^{**}	0,09 ^{ns}	0,99 ^{**}	143,35 [*]
Erro	34	8,68	1,00	0,07	0,10	55,56
C.V. (%)	-	9,07	7,97	9,93	7,83	23,51

^{**} e ^{*} significativo a 1% e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo.

O estudo de Rufino (2025), ao avaliar o uso de biochar de casca de cupuaçu em *Eutерpe precatoria*, identificou incremento linear crescente na altura das mudas quando associado à adubação convencional (NPK + micronutrientes). Essa tendência, embora para uma espécie diferente, corrobora a eficácia do biochar de cupuaçu em promover o crescimento contínuo com a fertilização mineral. Rufino (2025) observou, inclusive, que a adubação convencional NPK + micronutrientes resultou em melhor crescimento em altura do que o fertilizante de liberação lenta (FLC), o que se alinha aos nossos achados que mostram a superioridade da adubação convencional em termos de altura em *E. oleracea*.

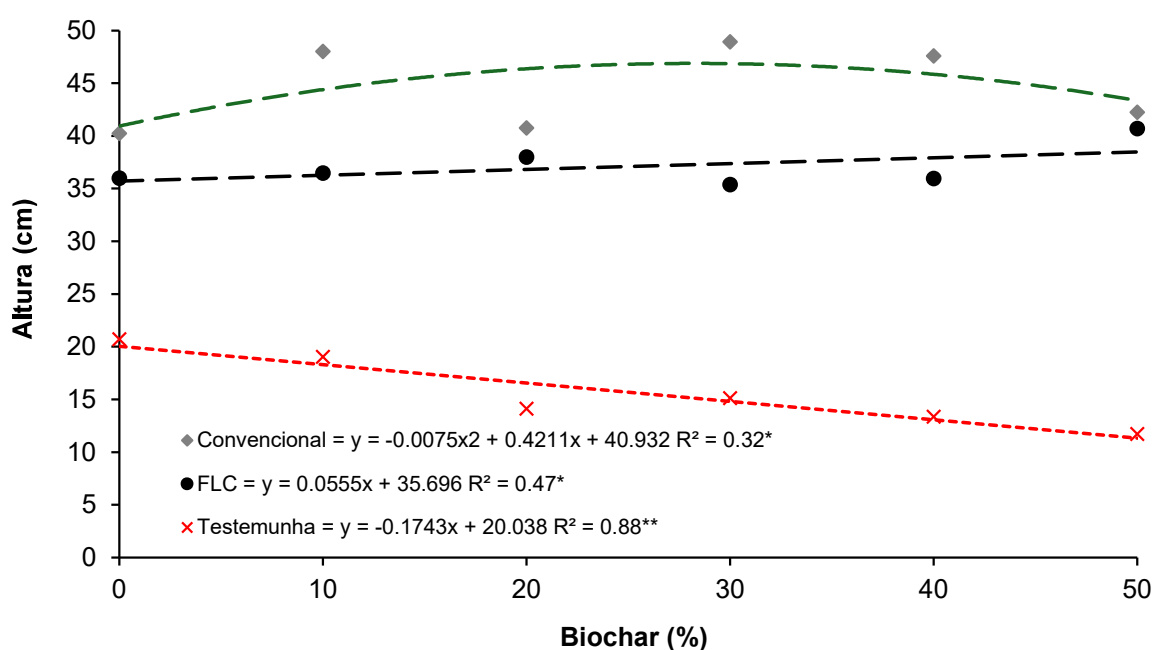
a) Altura da Planta (AP)

Os efeitos do CUP na altura da planta variaram significativamente com o regime de adubação (Figura 17). No tratamento com adubação convencional, observou-se uma resposta quadrática, com um ponto de máxima estimado em 28,07% de biochar, resultando em plantas com 46,84 cm de altura. Este comportamento pode ser explicado pela capacidade do CUP de otimizar a disponibilidade de nutrientes da adubação convencional. A Tabela 1 demonstra que o CUP possui um perfil nutricional rico em macronutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, além de elevada CTC e uma CRA superior. Essas propriedades permitem que o biochar retenha os nutrientes da adubação convencional, reduzindo perdas por lixiviação e liberando-os gradualmente, o que promove um crescimento robusto até um ponto de saturação, a partir do qual doses adicionais podem não gerar ganhos proporcionais ou mesmo causar desequilíbrios.

Para o tratamento com fertilizante de liberação controlada (FLC), a resposta foi linear crescente (Figura 17), indicando que maiores concentrações de CUP favoreceram o alongamento da parte aérea. A sinergia aqui reside na capacidade do CUP de estabilizar o ambiente do substrato (melhorando CRA e CTC, conforme Tabela 1), complementando a liberação gradual de nutrientes do FLC. Isso assegura um suprimento contínuo e eficiente para a muda, sem os picos de disponibilidade associados à adubação convencional que podem ser atenuados em altas concentrações de biochar.

Em contraste, a testemunha (sem adubação) apresentou uma tendência linear decrescente na altura com o aumento do CUP (Figura 17). Este resultado é crucial, pois demonstra que, na ausência de um aporte nutricional externo, o biochar sozinho não é capaz de sustentar o crescimento de forma eficiente. O CUP, embora rico em nutrientes (Tabela 1), não atua como um fertilizante completo por si só; em concentrações mais altas, pode ocorrer um efeito de diluição dos nutrientes presentes no substrato base ou a imobilização de fósforo no solo, associada à atividade microbiana estimulada pelo biochar (Li *et al.*, 2023), resultando em menor crescimento.

Figura 17. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre a altura de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024



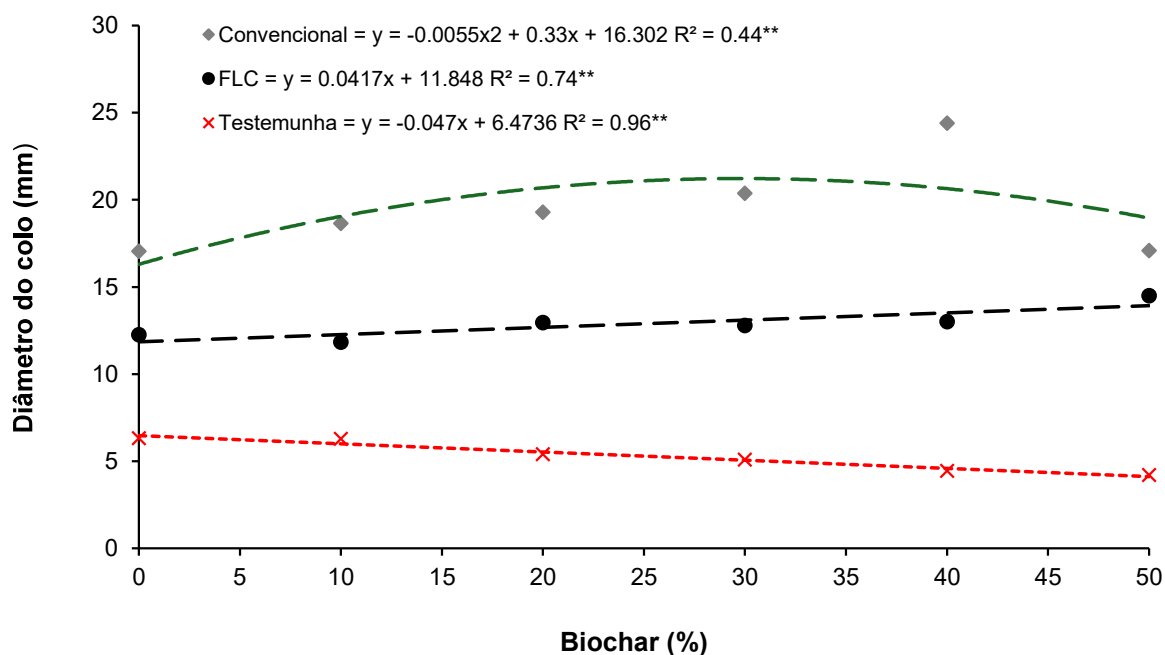
b) Diâmetro do Colo (DC)

Os resultados para o diâmetro do colo (DC) seguiram um padrão similar ao da altura (Figura 18). Na adubação convencional, o CUP induziu um efeito quadrático, com um ponto de máxima estimado em 30% de biochar (21,25 mm). A melhoria das condições físico-químicas do substrato pelo CUP, evidenciada pela elevada capacidade de troca catiônica (CTC), maior capacidade de retenção de água (CRA) e pH favorável (Tabela 1), contribuiu para maior disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas,

favorecendo a formação de tecidos de sustentação e, conseqüentemente, promovendo o engrossamento do caule (Lehmann; Joseph, 2015).

Com o FLC, o incremento no DC foi linear, reforçando a capacidade do CUP de otimizar a disponibilidade dos nutrientes de liberação lenta. Já na testemunha, o decréscimo linear do DC com o aumento do biochar reafirma a limitação do CUP quando não complementado por adubação, podendo induzir imobilização de fósforo no solo, associada à atividade microbiana estimulada pelo biochar (Li *et al.*, 2023), o que pode comprometer o crescimento em espessura.

Figura 18. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre o diâmetro do colo de mudas de açazeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024



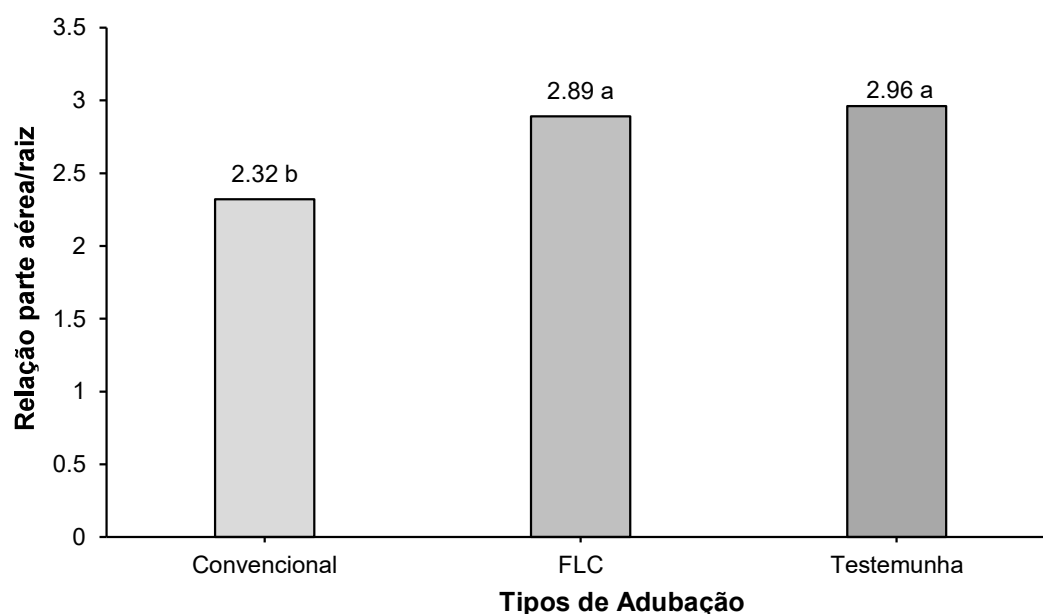
Em consonância com nossos resultados, Rufino (2025) observou que o biochar de casca de cupuaçu, associado à adubação convencional, influenciou significativamente o diâmetro do colo de *Euterpe precatoria*, evidenciando respostas dependentes da concentração e indicando a existência de níveis ótimos de aplicação. A tese de Rufino (2025) destacou a superioridade da adubação convencional com NPK + micronutrientes em comparação ao fertilizante de liberação controlada para essa variável, resultado que se alinha à maior eficiência do tratamento convencional observada no presente estudo para *Euterpe oleracea*.

c) Relação Altura/Diâmetro (RAD)

A RAD, indicador da robustez da muda, não apresentou interação significativa entre o biochar e os tipos de adubação, sendo influenciada pelos fatores de forma independente (Tabela 4). A adubação convencional resultou nos menores valores médios de RAD (2,32, Figura 19), indicando mudas mais robustas. Este perfil está alinhado com as propriedades do CUP (Tabela 1) de promover um crescimento mais equilibrado, favorecendo a alocação de biomassa radicular e caulinar (Antonangelo, Sun e Eufrade-Junior, 2025). Em contraste, o FLC e a testemunha apresentaram RADs mais elevadas (2,89 e 2,96, respectivamente), sugerindo maior alongamento e menor robustez, o que pode estar relacionado a um menor equilíbrio nutricional ou liberação mais lenta sem o aporte da adubação convencional.

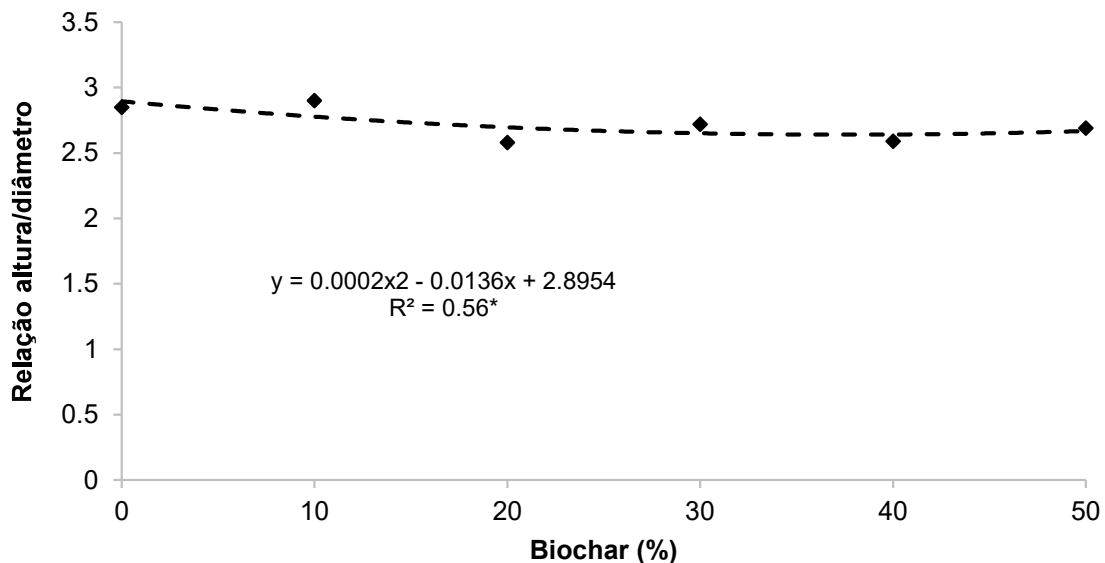
Em relação às concentrações de biochar, observou-se uma resposta quadrática com um ponto de mínimo estimado em 34% de CUP, correspondendo a uma RAD de 2,66 (Figura 19). Isso indica que concentrações intermediárias de biochar promoveram melhor equilíbrio entre crescimento vertical e espessura do colo, possivelmente em função da otimização das condições físicas do substrato (CRA e estrutura; Tabela 1), efeito amplamente associado ao uso de biochar em diferentes sistemas de cultivo (Murtaza *et al.*, 2024).

Figura 19. Relação altura/diâmetro de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de tipos de adubação. Rio Branco, AC, 2024



* Médias seguidas de mesma letra não diferem ($p > 0,05$) entre si pelo teste de Tukey

Figura 20. Relação altura/diâmetro de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de concentrações de biochar de casca de cupuaçu. Rio Branco, AC, 2024



Rufino (2025) também avaliou a relação altura/diâmetro do colo (RAD) em mudas de *Euterpe precatoria* e verificou que a adubação convencional com NPK + micronutrientes foi superior ao fertilizante de liberação lenta, resultando em menores valores de RAD. Essa convergência de resultados com nosso estudo reforça que a adubação convencional, possivelmente devido à maior e mais imediata disponibilidade de nutrientes, contribui para a formação de mudas mais equilibradas e robustas em ambas as espécies de açaí, quando combinada ao biochar de casca de cupuaçu.

d) Número de Folhas (NF) e Índice SPAD

O número de folhas por planta e o índice SPAD (Figura 21) apresentaram respostas quadráticas para a adubação convencional e o FLC. Na adubação convencional, o NF máximo foi de 5,82 folhas por planta na concentração de 28,77% de CUP, e o SPAD máximo de 59,55 unidades na concentração de 39,15%. Estes picos indicam que as propriedades do CUP (Tabela 1), como sua riqueza nutricional (especialmente em N) e capacidade de melhorar a absorção de nutrientes, otimizaram o desenvolvimento foliar e a síntese de clorofila. Yang *et al.* (2024a) e Yang *et al.*, (2024b) observaram que taxas intermediárias de aplicação de biochar promoveram aumento do número de folhas e melhorias em parâmetros fisiológicos associados à

clorofila, como os valores de SPAD. De forma complementar, Frimpong *et al.* (2025) relataram efeitos positivos do biochar sobre o crescimento vegetal.

A testemunha, por sua vez, exibiu tendência linear decrescente para NF e SPAD. Isso reforça que, sem adubação, o CUP, mesmo com seu perfil nutricional intrínseco (Tabela 1), não pode compensar a carência de nutrientes para a formação de folhas e a síntese de clorofila em doses mais elevadas. Ghaedi *et al.* (2024) indicam que o biochar, embora promova melhorias em propriedades do solo e no estado nutricional das plantas, não atua como fonte completa de nutrientes, podendo ser necessário manejo nutricional complementar, especialmente sob condições de estresse hídrico.

Figura 21. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre o número de folhas de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco – AC, 2024

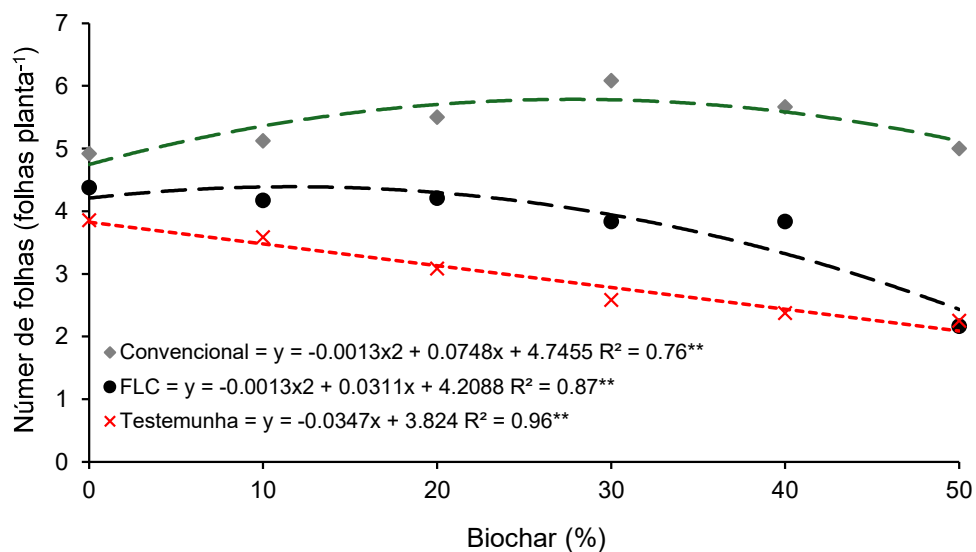
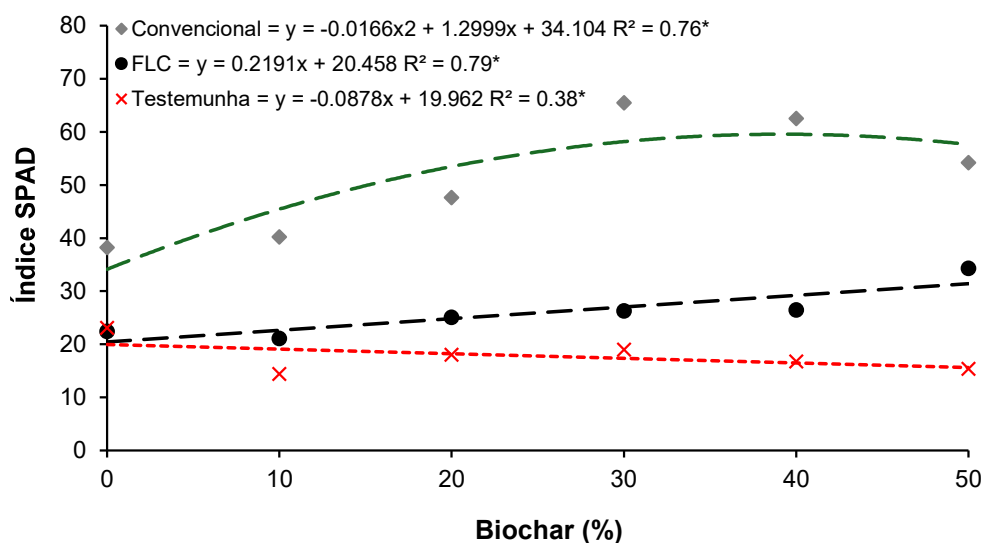


Figura 22. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre o índice SPAD de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024



Os achados de Rufino (2025) para *Euterpe precatoria*, ao avaliar o biochar de casca da amêndoa da castanha-do-brasil no Capítulo I de seu trabalho, indicaram que o número de folhas e o índice SPAD não apresentaram resposta significativa aos tratamentos. Esse comportamento diverge dos resultados observados no presente estudo para *Euterpe oleracea* com biochar de casca de cupuaçu, no qual foram identificadas respostas quadráticas para o número de folhas e o índice SPAD, tanto sob adubação convencional quanto sob fertilizante de liberação controlada.

No entanto, no Capítulo II de seu trabalho, ao avaliar o biochar de casca de cupuaçu, Rufino (2025) observou que o índice SPAD ajustou-se a um modelo de regressão linear crescente para ambas as adubações (convencional e fertilizante de liberação controlada), com a adubação convencional apresentando valores superiores de SPAD nas maiores concentrações de biochar. Essa tendência linear crescente de SPAD sob adubação convencional com biochar de cupuaçu é compatível com a otimização da absorção de N deste estudo.

4.3.2 Biomassa e Índice de qualidade de Dickson (IQD)

A Tabela 5 confirma interações significativas entre as concentrações de CUP e os tipos de adubação para massa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR), total

(MST) e IQD. Curiosamente, a relação parte aérea/raiz (RPAR) não foi significativamente influenciada, permanecendo estável entre os tratamentos (Figura 28). Esta estabilidade da RPAR, com uma média de 1,79, sugere que, embora os tratamentos tenham afetado o acúmulo total de biomassa. Esta estabilidade da RPAR, com média de 1,79, sugere que, embora os tratamentos tenham afetado o acúmulo total de biomassa, houve manutenção do equilíbrio entre o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular das mudas. Relações equilibradas entre esses compartimentos têm sido associadas a respostas positivas de crescimento em diferentes espécies vegetais sob aplicação de biochar (Sheffield, Hoefer e Petersen, 2024).

Tabela 5. Resumo da análise de variância para as variáveis massas secas da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST), relação parte aérea/raiz (RPAR) e índice de qualidade de Dickson (IQD) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua em função de concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação. Rio Branco, AC, 2024

FV	GL	Quadrados médios				
		MSPA	MSR	MST	RPAR	IQD
Bloco	2	0,73 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,08 ^{ns}
Concentrações (C)	5	7,03 ^{ns}	3,34 ^{ns}	10,26 ^{ns}	2,07 ^{ns}	1,46 ^{ns}
Adubação (A)	2	2700,13 ^{**}	762,57 ^{**}	6312,92 ^{**}	1,65 ^{ns}	394,49 ^{**}
C x A	10	3,57 [*]	7,57 [*]	16,26 [*]	2,13 ^{ns}	2,88 [*]
Erro	34	6,08	4,30	13,68	1,34	1,54
C.V. (%)	-	19,62	18,95	18,45	23,78	20,67

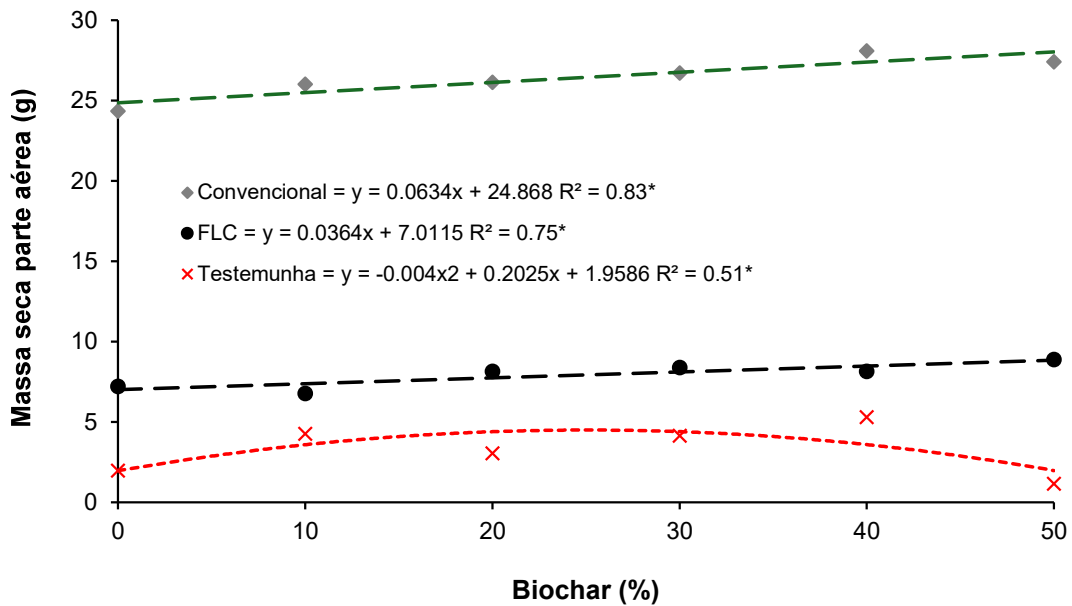
** e * significativo a 1% e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo.

a) Massa Seca da Parte Aérea (MSPA)

Nas adubações convencional e FLC, a MSPA apresentou um incremento linear crescente com o aumento das concentrações de CUP (Figura 23). A riqueza nutricional do CUP e sua capacidade de retenção de água e CTC (Tabela 1) proporcionaram um ambiente otimizado para a absorção contínua de nutrientes, favorecendo o acúmulo de biomassa acima do solo. Em contraste, a testemunha exibiu uma resposta quadrática, com um ponto máximo estimado em 25,31% de CUP (4,52 g de MSPA). Isso indica que, sem aporte nutricional adicional, o CUP

isoladamente promove um crescimento aéreo limitado, com um pico em doses médias, seguido por um declínio em concentrações extremas.

Figura 23. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre a massa seca da parte aérea de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024



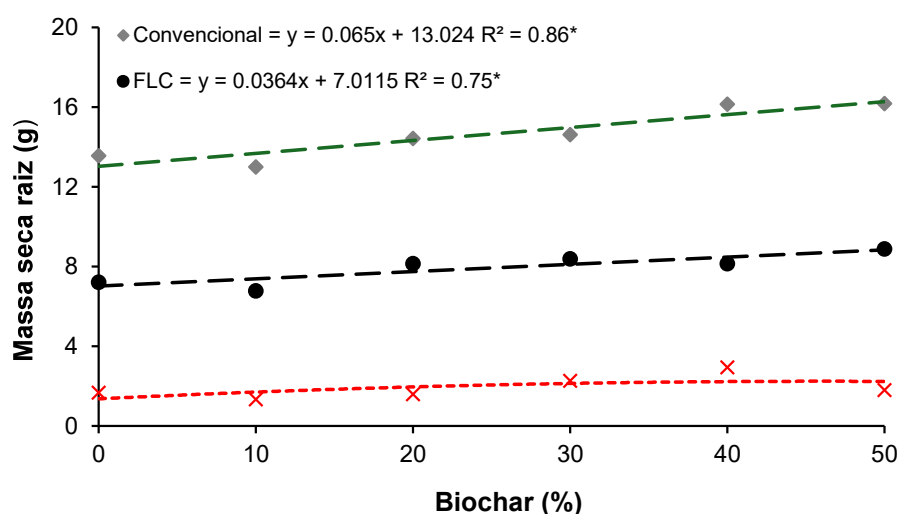
Os resultados de Rufino (2025) para *E. precatoria* em relação ao biochar de casca de cupuaçu também mostraram que a MSPA se ajustou a um modelo de regressão linear crescente para adubações convencional e FLC. Similarmente aos nossos achados, a adubação convencional foi superior ao FLC em termos de produção de biomassa aérea, reforçando a capacidade do biochar de cupuaçu de impulsionar o crescimento da parte aérea em sinergia com a fertilização mineral.

b) Massa Seca das Raízes (MSR)

A MSR também demonstrou tendência linear crescente sob adubação convencional e FLC (Figura 24), refletindo o crescimento progressivo do sistema radicular com o aumento das proporções de CUP. As propriedades do CUP que promovem melhorias na estrutura do solo, como maior porosidade e aeração (Tabela 1), favorecem a penetração das raízes e a absorção de água, criando condições mais adequadas ao desenvolvimento do sistema radicular (Frimpong *et al.*, 2025). Na

testemunha, observou-se uma resposta quadrática com um valor máximo estimado em 47,75% de CUP (2,27 g de MSR). Este comportamento indica que, sem fertilização, o CUP sozinho tem um efeito limitado sobre o crescimento radicular, com um aumento inicial seguido de estagnação ou declínio em altas concentrações devido a desequilíbrios nutricionais.

Figura 24. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre a massa seca das raízes de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024



Enquanto em neste estudo a MSR apresentou tendência linear crescente para adubações convencional e FLC, Rufino (2025) observou que a massa seca de raízes de *Euterpe precatoria* apresentou melhor desempenho sob adubação com fertilizante de liberação controlada. A autora atribuiu esse resultado ao elevado teor de fósforo no substrato contendo biochar de casca de cupuaçu, que, aliado à liberação gradual de nutrientes pelo FLC, teria proporcionado um ambiente favorável ao desenvolvimento radicular. Essa diferença pode indicar uma particularidade da resposta de *E. precatoria* ao uso do FLC ou refletir diferenças sutis na dinâmica de liberação de fósforo entre os experimentos.

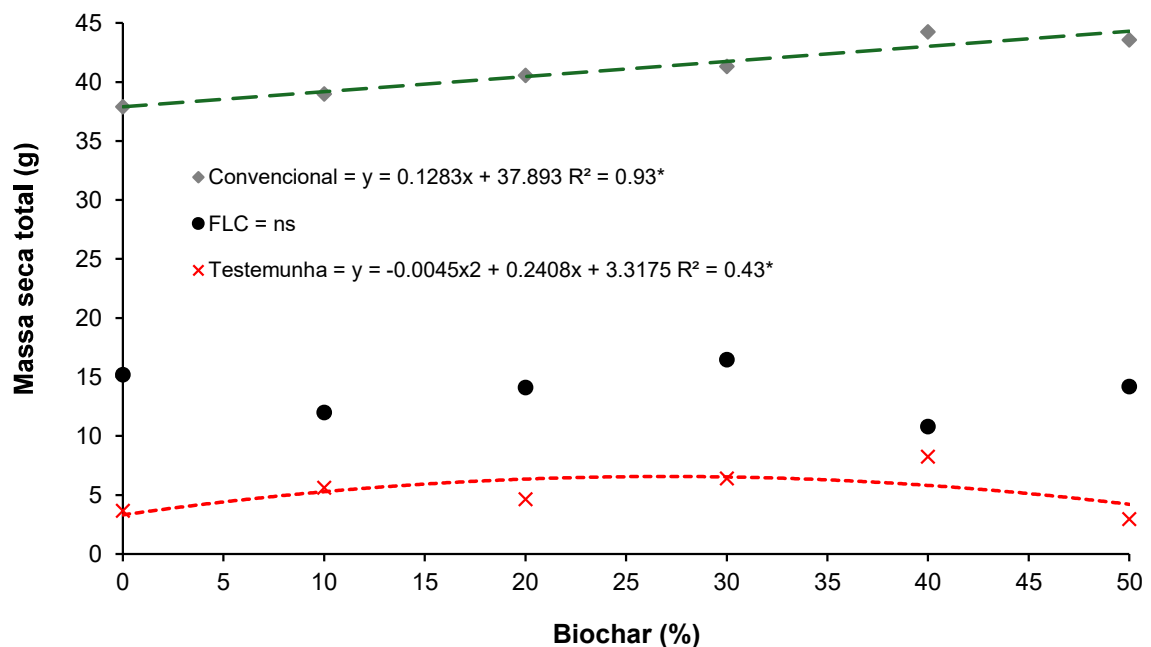
c) Massa Seca Total (MST)

A MST seguiu padrões diferenciados. Na adubação convencional, houve um incremento linear crescente em função das concentrações de CUP (Figura 25),

confirmando o efeito positivo e cumulativo das propriedades do biochar (Tabela 1) em sinergia com a fertilização mineral para o desenvolvimento global das mudas. No tratamento com FLC, a regressão não foi estatisticamente significativa, o que pode indicar que, para a MST, a interação do CUP com FLC não gerou um padrão linear ou quadrático claro dentro das concentrações testadas. Na testemunha, houve uma resposta quadrática, com um ponto de máxima estimado em 26,75% de CUP (26,54 g de MST), reafirmando as limitações do biochar isolado em promover um crescimento sustentado da biomassa total.

De forma semelhante aos nossos resultados, Rufino (2025) também verificou que a MST de *E. precatoria* ajustou-se a um modelo de regressão linear crescente para adubações convencional e FLC quando utilizou biochar de casca de cupuaçu. Para MSPA e MST, a adubação convencional foi superior à FLC, resultando em maior produção de biomassa, o que reforça o papel da adubação mineral contínua em maximizar o acúmulo de biomassa total, mesmo para *E. precatoria*.

Figura 25. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre a massa seca total de mudas de açazeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024



d) Relação Parte Aérea/Raiz (RPAR)

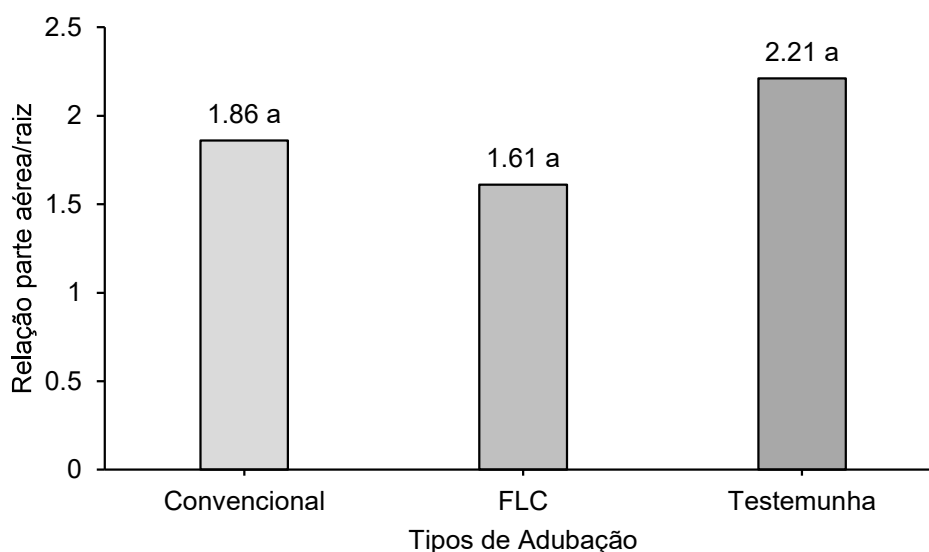
A Figura 26 apresenta a Relação Parte Aérea/Raiz (RPAR) de mudas de açaizeiro da variedade BRS Pai d'Égua em resposta a três regimes de adubação: convencional, fertilizante de liberação controlada (FLC) e testemunha. A RPAR é um parâmetro morfológico que quantifica a distribuição de biomassa entre a parte aérea (caules e folhas) e o sistema radicular, sendo um indicador do balanço fisiológico e da robustez da muda.

Os valores médios de RPAR observados foram de 1,86 para o tratamento convencional, 1,61 para o tratamento FLC e 2,21 para o grupo testemunha. Conforme indicado pela análise estatística (teste de Tukey, $p > 0,05$), não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias da RPAR para os diferentes tipos de adubação.

Este resultado é crucial para a tese, pois demonstra que, sob as condições experimentais avaliadas, os regimes de adubação testados não alteraram estatisticamente a proporção de biomassa alocada entre a parte aérea e as raízes das mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. A estabilidade da RPAR, mesmo diante de variações nos regimes nutricionais, sugere que as mudas mantiveram um balanço intrínseco de alocação de recursos entre os compartimentos vegetativos.

A manutenção de uma RPAR estável é frequentemente considerada um atributo desejável na produção de mudas florestais, pois indica um desenvolvimento equilibrado que pode conferir maior resiliência ao estresse ambiental e melhor sucesso de pegamento e estabelecimento no campo. A ausência de um efeito significativo sobre a RPAR, enquanto as massas secas totais podem ter sido influenciadas, implica que, embora os tratamentos pudessem promover maior acúmulo de biomassa geral, não desestabilizaram o equilíbrio fundamental entre a parte aérea e o sistema radicular. Essa evidência reforça a adaptabilidade da variedade BRS Pai d'Égua e/ou a capacidade do biochar de modular o ambiente do substrato para sustentar um crescimento balanceado, independentemente da fonte de adubação, no que concerne a essa proporção específica.

Figura 26. Relação parte aérea/raiz de mudas de açazeiro BRS Pai d'Égua em função de tipos de adubação. Rio Branco, AC, 2024



* Médias seguidas de mesma letra não diferem ($p > 0,05$) entre si pelo teste de Tukey

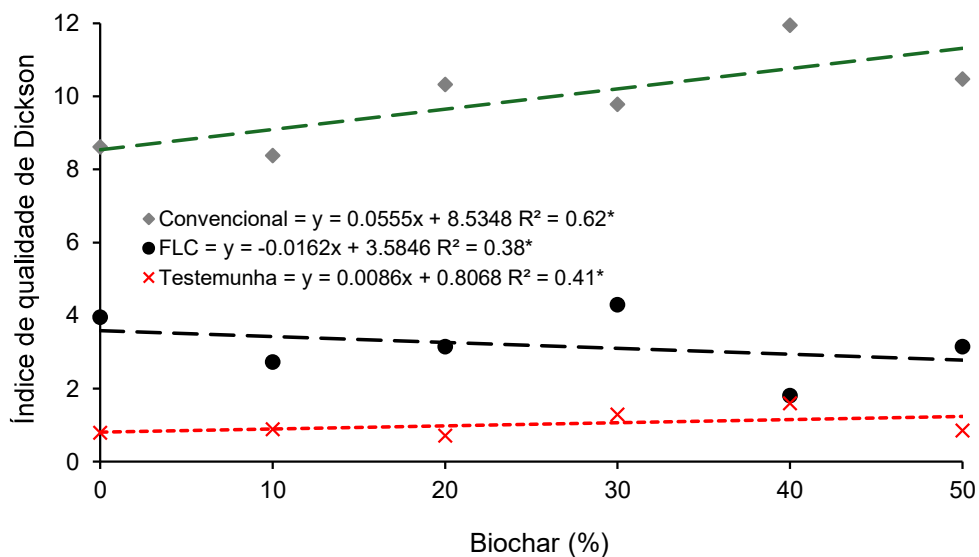
De forma semelhante aos nossos resultados, Rufino (2025) também verificou que a massa seca total (MST) de *Euterpe precatoria* ajustou-se a um modelo de regressão linear crescente sob adubação convencional e fertilizante de liberação controlada, quando utilizado biochar de casca de cupuaçu. Para MSPA e MST, a adubação convencional foi superior à FLC, resultando em maior produção de biomassa, o que reforça o papel da adubação mineral contínua em maximizar o acúmulo de biomassa total, mesmo para *E. precatoria*.

e) Índice de Qualidade de Dickson (IQD)

O IQD, um indicador robusto do vigor e da qualidade das mudas (Alonso, Sodré e Silva, 2024), apresentou respostas distintas com a adubação. Na adubação convencional, o IQD mostrou um incremento linear positivo (Figura 27), evidenciando que maiores concentrações de CUP resultaram em mudas de melhor qualidade. Este resultado é uma consequência direta da otimização de todas as variáveis de crescimento e biomassa promovida pelas propriedades do CUP (Tabela 1) em conjunto com a fertilização. Na testemunha, o IQD também exibiu um comportamento linear crescente, embora em níveis substancialmente inferiores, indicando que o CUP,

mesmo sem adubação, conferiu algum benefício na qualidade das mudas. Em contraste, o FLC mostrou uma tendência linear decrescente no IQD, sugerindo que o aumento das doses de CUP com FLC pode ter levado a um decréscimo na qualidade morfológica. Isso pode estar relacionado a uma complexa interação onde, em concentrações mais elevadas, o CUP interfere na liberação ideal de nutrientes do FLC ou cria um ambiente desfavorável para a sua eficiência.

Figura 27. Desdobramento da interação entre concentrações de biochar de casca de cupuaçu e tipos de adubação sobre o índice de qualidade de Dickson de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua. Rio Branco, AC, 2024



Os achados de Rufino (2025) para *E. precatoria* em relação ao biochar de casca de cupuaçu também revelaram que o IQD se ajustou a uma regressão linear crescente para ambas as fertilizações (convencional e FLC), sem um ponto de máxima. A autora observou que o FLC foi mais eficiente, alcançando um IQD de 3,17 com 50% de biochar. Esta é uma divergência importante em relação aos nossos resultados para *E. oleracea*, onde a adubação convencional mostrou um incremento linear positivo no IQD, enquanto o FLC apresentou uma tendência linear decrescente. As diferenças podem ser atribuídas às particularidades das espécies (açaí-de-touceira vs. açaí-solteiro), que podem ter diferentes exigências nutricionais ou respostas fisiológicas à liberação de nutrientes do FLC em combinação com o biochar de cupuaçu.

4.3.3 Incremento de crescimento

A Tabela 6 demonstra uma interação significativa entre os meses após a repicagem e as concentrações de biochar, em todos os tipos de adubação, para o incremento médio mensal (IMM) em altura e diâmetro do colo. Isso revela uma dinâmica de crescimento temporal que é modulada pela presença de CUP e pelo regime de fertilização.

Tabela 6. Resumo da análise de variância dos incrementos mensais em altura e diâmetro do colo de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua, em função das concentrações de biochar de casca de cupuaçu ao longo dos meses após a repicagem, sob três fontes de adubação. Rio Branco, AC, 2024

FV	GL	Quadrados médios					
		Incremento em altura			Incremento em diâmetro do colo		
		Convencional	FLC	Testemunha	Convencional	FLC	Testemunha
Bloco	2	1,39 ^{ns}	1,03 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Meses (M)	3	81,49 ^{**}	70,18 ^{**}	1,84 ^{**}	18,71 ^{**}	3,05 ^{**}	0,83 ^{**}
Biochar (B)	5	4,44 ^{ns}	0,54 ^{ns}	1,92 ^{**}	1,63 ^{**}	0,12 ^{ns}	0,10 [*]
M x B	15	4,87 [*]	2,52 ^{**}	0,44 ^{**}	2,31 ^{**}	0,43 [*]	0,10 ^{**}
Erro	46	2,54	0,55	0,13	0,27	0,21	0,03
C.V. (%)		20,02	16,96	23,6	19,48	21,38	24,70

** e * significativo a 1% e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo

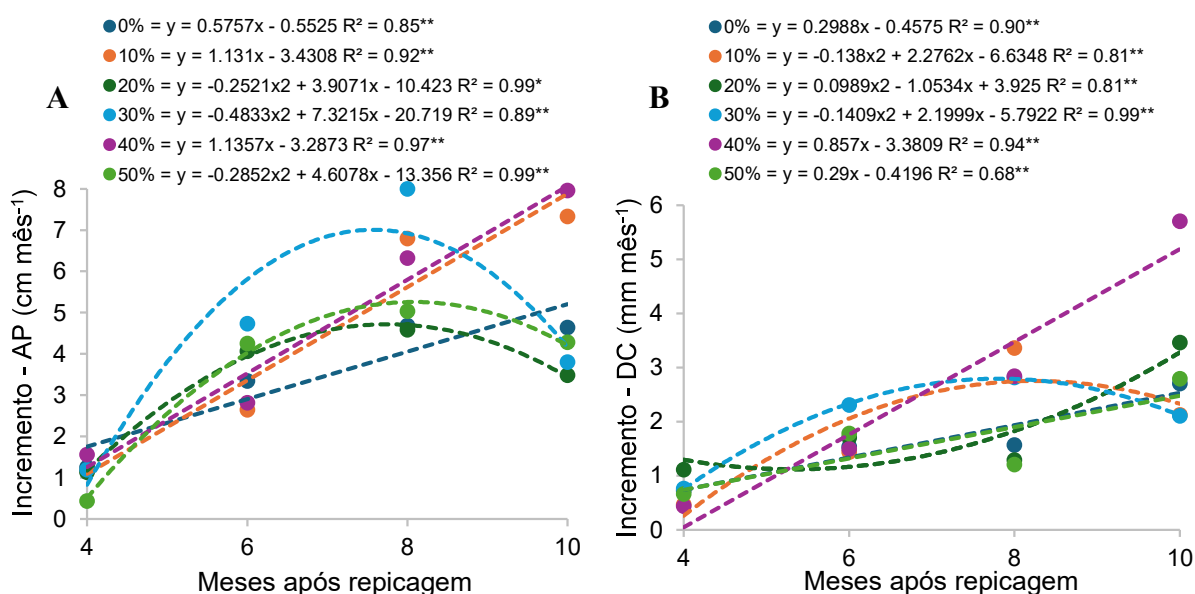
Recentemente, Cong *et al.* (2023) documentaram que o efeito do biochar na altura e biomassa de plantas de milho foi crescente ao longo de vários ciclos, especialmente em solos de baixa fertilidade. Embora seu estudo seja de longa duração, ele evidencia que o biochar promove respostas de crescimento que se intensificam com o tempo, o que está em consonância com a interação observada entre meses e concentrações de biochar no seu experimento.

a) Incremento Mensal em Altura e Diâmetro do Colo na Adubação Convencional

A Figura 28A e 28B ilustra que, sob adubação convencional, o IMM em altura e diâmetro do colo apresentou padrões variados, com respostas lineares crescentes para algumas concentrações (0%, 10% e 40% para altura; 0%, 40% e 50% para diâmetro) e quadráticas para outras (20%, 30% e 50% para altura; 10% e 30% para diâmetro), com picos de crescimento geralmente entre 7 e 8 meses.

A capacidade do CUP de otimizar a liberação e absorção de nutrientes, em função de sua elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e capacidade de retenção de água (CRA) (Tabela 1), permitiu que a adubação convencional sustentasse o crescimento das mudas ao longo do ciclo, com incrementos mais pronunciados em fases mais tardias, conforme observado nos picos de crescimento. Esse comportamento indica que o substrato otimizado com CUP e adubação convencional forneceu condições favoráveis ao desenvolvimento das mudas a médio prazo, em consonância com estudos que mostram que a adição de biochar ao substrato melhora o crescimento, as propriedades fisiológicas e o vigor de mudas antes e após o transplântio (Ma *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2020).

Figura 28. Incremento mensal da altura da planta (A) e do diâmetro do colo (B) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua submetidas a concentrações de biochar de casca de cupuaçu e adubação convencional durante o período em viveiro. Rio Branco, AC, 2024

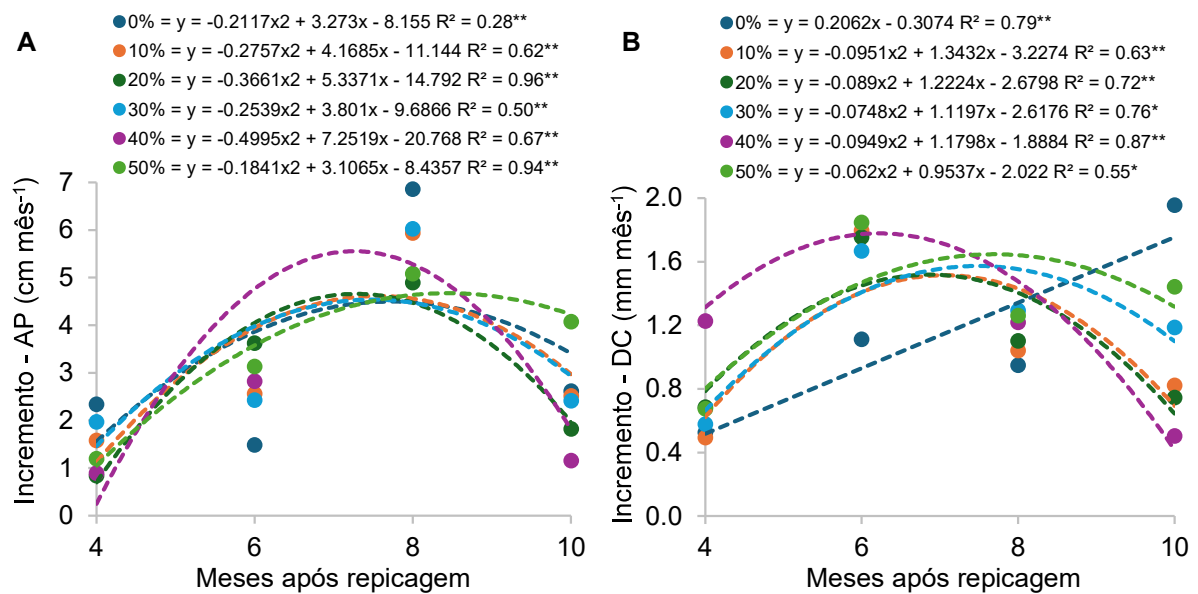


b) Incremento Mensal em Altura e Diâmetro do Colo no FLC

Sob FLC, os incrementos médios mensais em altura e diâmetro do colo apresentaram predominantemente comportamentos quadráticos para todas as concentrações de CUP (Figura 29A e 29B), com picos de crescimento em diferentes meses. Isso reflete a interação entre a liberação gradual de nutrientes do FLC e a capacidade do CUP (Tabela 1) de reter e disponibilizar esses nutrientes de forma

sustentada. Essa combinação promoveu incrementos consistentes na biomassa ao longo do tempo. Tal comportamento sugere que a associação favorece a eficiência nutricional e o crescimento vegetal, em consonância com estudos que demonstram efeitos positivos dessa combinação sobre o crescimento e o uso de nutrientes pelas plantas (Manzoor *et al.*, 2022).

Figura 29. Incremento mensal da altura da planta (A) e do diâmetro do colo (B) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua submetidas a concentrações de biochar de casca de cupuaçu e FLC durante o período em viveiro. Rio Branco, AC, 2024

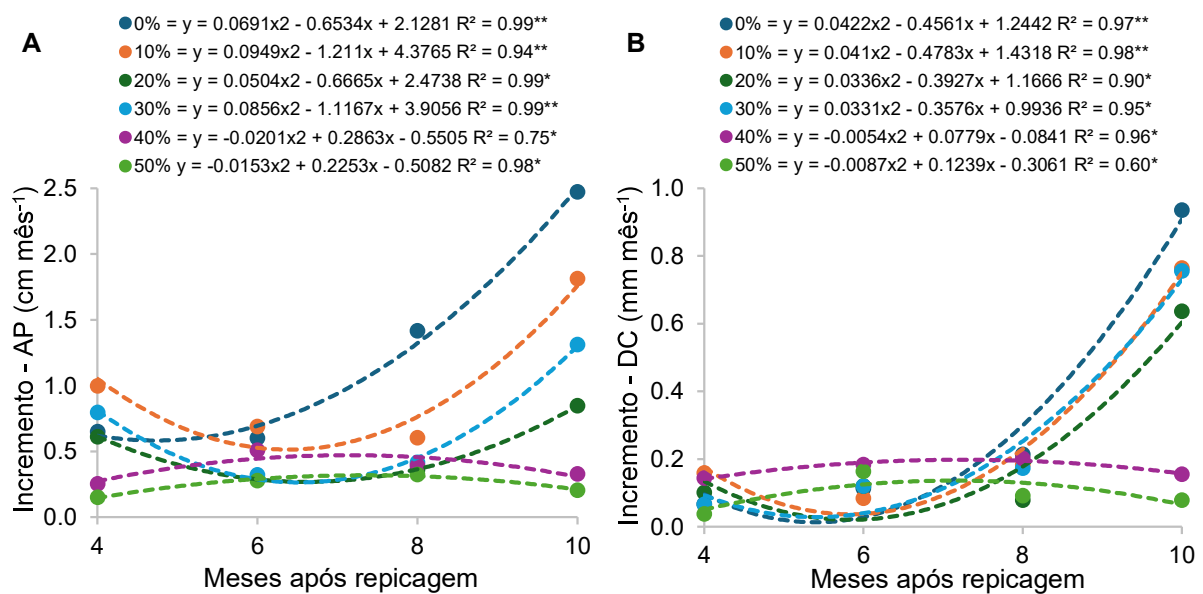


Rufino (2025) também observou, para *E. precatoria* com biochar de cupuaçu e FLC, que o incremento em altura se ajustou a uma regressão quadrática, com o incremento máximo variando de acordo com a concentração de biochar ao longo do tempo. Para o diâmetro do colo, a autora igualmente encontrou um padrão de regressão quadrática sob FLC. Essa similaridade nos padrões quadráticos de incremento mensal sob FLC entre *E. oleracea* e *E. precatoria* sugere que a interação entre a liberação gradual de nutrientes do FLC e as propriedades do biochar de cupuaçu (retenção e liberação de nutrientes, melhoria da estrutura do substrato) induz uma dinâmica de crescimento temporal com picos de eficiência, mas limitada pela taxa de liberação do fertilizante.

c) Incremento Mensal em Altura e Diâmetro do Colo na Testemunha

Na testemunha, os incrementos mensais em altura e diâmetro do colo exibiram padrões quadráticos (Figura 30A e 30B), com pontos de mínimas iniciais seguidos por recuperação, ou picos mais tardios. Esse comportamento sugere um modesto crescimento inicial, possivelmente devido à imobilização de nutrientes ou à liberação mais lenta dos nutrientes do biochar, seguido por uma recuperação à medida que o biochar se integra ao substrato e suas propriedades físicas (CRA e estrutura, Tabela 1) oferecem benefícios para a muda. No entanto, mesmo com o CUP, sem adubação, o crescimento foi limitado em comparação com os outros tratamentos, especialmente em altas concentrações, onde a ausência de nutrientes externos se tornou um fator mais restritivo. Biochar e biofertilizantes podem influenciar a dinâmica de nutrientes e estimular o crescimento de mudas, mas, na ausência de adubação convencional, o crescimento tende a ser menor do que nos tratamentos com fertilizantes externos (Agarwal *et al.*, 2022).

Figura 30. Incremento mensal da altura da planta (A) e do diâmetro do colo (B) de mudas de açaizeiro BRS Pai d'Égua submetidas a concentrações de biochar de casca de cupuaçu sem adubação durante o período em viveiro. Rio Branco, AC, 2024



4.4.4 Discussão Integrada dos Mecanismos e Implicações

A interação observada entre o biochar de casca de cupuaçu (CUP) e os diferentes regimes de adubação, que resultou em padrões variados de respostas (lineares e quadráticas) para as variáveis de crescimento e biomassa, indica complexos mecanismos de sinergia e otimização. O perfil físico-químico do CUP, detalhado na Tabela 1 do Capítulo 1, desempenha um papel central nessas interações. A elevada capacidade de troca catiônica (CTC), a alta capacidade de retenção de água (CRA) e o pH ligeiramente alcalino (7,4 na concentração de 50%) do CUP atuam como um "buffer" nutricional e hídrico no substrato. Este efeito é particularmente evidente na adubação convencional, onde a liberação mais rápida de nutrientes é complementada pela capacidade do biochar de adsorvê-los e liberá-los gradualmente, minimizando perdas por lixiviação e mantendo a disponibilidade para as mudas por um período mais longo. Essa ação do biochar transforma a natureza da adubação, aproximando-a de um sistema de liberação mais controlada e aumentando a eficiência de uso dos nutrientes pelas plantas.

No contexto da adubação com fertilizante de liberação controlada (FLC), que por sua natureza já proporciona um fornecimento gradual de nutrientes, o biochar de cupuaçu pode ter atuado como um otimizador do microambiente radicular. Sua estrutura porosa e estabilidade física contribuem para a aeração do substrato e para a formação de nichos que favorecem a atividade microbiana benéfica e o crescimento radicular. Dessa forma, os nutrientes liberados pelo FLC encontram um ambiente radicular mais propício à absorção e ao aproveitamento, potencializando a eficácia do fertilizante e garantindo um crescimento mais sustentado. A não-significância de algumas respostas lineares para o FLC em determinadas variáveis de biomassa, como a MST, pode indicar que a combinação FLC-biochar, embora beneficie o crescimento de forma consistente, não elevou o acúmulo de biomassa de maneira exponencial como a adubação convencional, que parece ter explorado um potencial de "arrancada" inicial mais pronunciado em sinergia com o biochar.

A distinção entre respostas lineares e quadráticas observadas para diferentes parâmetros e regimes de adubação é crucial para a compreensão dos limites e da otimização do uso do biochar. As respostas quadráticas, especialmente na adubação convencional para altura e diâmetro, ou na testemunha para biomassa, indicam a existência de um ponto ótimo de concentração do biochar para maximizar esses

atributos. A partir desse ponto, doses adicionais não resultam em ganhos proporcionais e podem até levar a um declínio na performance, seja por saturação de sítios de adsorção, estresse osmótico (se a condutividade elétrica atingir níveis problemáticos, embora a Tabela 1 indique que o CUP permaneceu em níveis seguros) ou imobilização de nutrientes na ausência de adubação suplementar. As respostas lineares crescentes, por outro lado, sugerem que os benefícios para determinados parâmetros ainda não foram totalmente explorados nas doses testadas, indicando um potencial para investigações com concentrações ainda mais elevadas, sempre ponderando os custos e a aplicabilidade prática.

A estabilidade da Relação Parte Aérea/Raiz (RPAR), conforme demonstrado pela ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos na Figura 27, representa um achado de grande relevância fisiológica e agrônômica. Este resultado sugere uma forte homeostase fisiológica da cultivar BRS Pai d'Égua, ou seja, uma capacidade intrínseca da planta de manter um equilíbrio proporcional entre o crescimento da parte aérea e do sistema radicular, mesmo sob diferentes estímulos nutricionais. Este equilíbrio é um atributo altamente desejável na produção de mudas, pois confere maior robustez e resiliência ao transplântio. Uma muda com RPAR balanceada está mais preparada para a transição para o campo, onde o estresse hídrico e nutricional é comum, pois possui um sistema radicular desenvolvido o suficiente para sustentar as demandas da parte aérea. A manutenção dessa proporção, mesmo em contextos de maior biomassa bruta (como na adubação convencional com biochar), indica que as intervenções não desorganizaram o padrão de desenvolvimento fundamental da planta.

Finalmente, os resultados deste capítulo reforçam as implicações econômicas e ambientais da utilização do biochar de casca de cupuaçu. A otimização do crescimento e da qualidade das mudas com doses intermediárias (20-30%) de CUP em combinação com adubação convencional não apenas promove o desenvolvimento de mudas vigorosas, mas também contribui para a economia circular, transformando um resíduo agroindustrial amazônico em um insumo de alto valor agregado. Esta abordagem reduz a dependência de fertilizantes exclusivamente minerais, minimiza o descarte de resíduos e pode diminuir os custos de produção em viveiro, alinhando-se com princípios de sustentabilidade e bioeconomia na região amazônica.

4.4 CONCLUSÕES

O biochar de casca de cupuaçu apresentou interação significativa com os regimes de adubação, influenciando de forma consistente o crescimento e a qualidade das mudas.

A combinação de biochar de casca de cupuaçu com adubação mineral convencional (NPK + micronutrientes) foi a estratégia mais eficiente, promovendo os maiores incrementos em altura de planta, diâmetro do colo, número de folhas, índice SPAD, biomassa aérea, radicular e total, além do Índice de Qualidade de Dickson (IQD).

Concentrações de biochar entre 28% e 30% associadas à adubação convencional maximizaram o crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa, indicando um ponto de máxima eficiência agronômica.

A adubação com fertilizante de liberação controlada (FLC) resultou em ganhos moderados, inferiores aos obtidos com a adubação convencional associada ao biochar.

O uso de biochar na ausência de adubação apresentou efeitos limitados e, em alguns casos, reduções nos parâmetros de crescimento avaliados.

A relação parte aérea/raiz manteve-se estável entre os tratamentos, indicando equilíbrio morfoestrutural das mudas, independentemente das combinações avaliadas.

Conclui-se que o biochar de casca de cupuaçu atua como um importante condicionador de substrato e promotor da eficiência nutricional quando associado à adubação mineral convencional, elevando o vigor e a qualidade das mudas de açaizeiro, enquanto seu uso isolado não é suficiente para sustentar o desenvolvimento adequado.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Esta tese investigou a sinergia entre biochar derivado de resíduos agroindustriais amazônicos e diferentes estratégias de adubação na produção de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.), cultivar BRS Pai d'Égua. Os resultados consolidam uma contribuição significativa para a agroecologia amazônica, ao validar o potencial de valorização de biomassas regionais para a produção de um condicionador de substrato de alta performance.

O Capítulo I estabeleceu a relevância de biochars de casca de cupuaçu, caroço de açaí e casca de castanha-do-brasil. As análises físico-químicas não apenas confirmaram sua riqueza em carbono, macro e micronutrientes, mas também propriedades estruturais superiores, como elevada capacidade de retenção de água e de troca catiônica. Particularmente, o biochar de casca de cupuaçu (CUP) destacou-se por um perfil nutricional otimizado e características ideais para aprimorar substratos. Este achado fundamental sublinha a viabilidade de transformar passivos ambientais em insumos estratégicos para a bioeconomia, alinhando-se aos princípios da economia circular e da sustentabilidade regional.

A investigação do Capítulo II revelou a complexidade e a magnitude da interação entre o biochar de casca de cupuaçu e os regimes de adubação. A associação sinérgica do biochar com a adubação convencional demonstrou ser a estratégia mais eficaz para aprimorar a qualidade das mudas. Esta combinação promoveu os maiores incrementos em altura da planta, diâmetro do colo, número de folhas, índice SPAD, e, crucialmente, no acúmulo de biomassa da parte aérea, radicular e total. Tais melhorias culminaram em um Índice de Qualidade de Dickson (IQD) significativamente elevado, indicando mudas mais vigorosas e com maior probabilidade de sucesso pós-transplante. Concentrações intermediárias de biochar, especificamente entre 20% e 30% quando combinadas com adubação convencional, foram identificadas como a faixa de máxima eficiência, otimizando o retorno agrônomo sem exceder os limites benéficos do material.

A estabilidade da Relação Parte Aérea/Raiz (RPAR), que não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, merece especial destaque. Este resultado é uma evidência da robusta homeostase fisiológica da cultivar BRS Pai d'Égua, que mantém um equilíbrio intrínseco de alocação de biomassa entre seus compartimentos, independentemente das variações na

adubação e na presença de biochar. Tal equilíbrio é um preditor fundamental da adaptabilidade e resiliência das mudas em condições de campo. Os incrementos mensais de crescimento, por sua vez, revelaram a dinâmica temporal da sinergia, com picos de desenvolvimento observados entre o sétimo e o oitavo mês, reforçando que o biochar, em combinação com adubação, prolonga e otimiza a fase de crescimento em viveiro.

Em síntese, esta tese estabelece o biochar de casca de cupuaçu não como um mero aditivo, mas como um componente transformador do substrato, capaz de amplificar a eficiência da adubação mineral convencional. O estudo ressalta que o uso isolado do biochar não é suficiente para sustentar um crescimento adequado, mas sua integração inteligente promove o vigor, o equilíbrio morfológico e a qualidade final das mudas de açaizeiro. Esta abordagem não apenas eleva o padrão de produção em viveiros, mas também concretiza um modelo de agricultura mais sustentável e regenerativa para a Amazônia.

Para consolidar e expandir os achados desta tese, faz-se necessária a continuação das investigações em diversas frentes. Em primeiro lugar, a validação em campo do desempenho de longo prazo das mudas. Isso implica em correlacionar os atributos de qualidade observados em viveiro, como o IQD e a estabilidade da RPAR, com a sobrevivência, o crescimento e a produtividade das plantas uma vez estabelecidas em condições reais de cultivo, proporcionando uma compreensão holística do sucesso da tecnologia.

Adicionalmente, sugere-se aprofundar a compreensão dos mecanismos bioquímicos e nutricionais envolvidos. Tal investigação deve abordar o perfil de absorção e translocação de nutrientes nos tecidos da planta, bem como seus impactos diretos na eficiência fotossintética e no metabolismo secundário. O objetivo é elucidar os processos fisiológicos mais profundos que regem a sinergia entre o biochar de casca de cupuaçu e a adubação, detalhando como o ambiente do substrato modificado se traduz em respostas celulares e moleculares.

Outro ponto fundamental reside na otimização e padronização da produção do biochar. Recomenda-se, portanto, aprofundar estudos sobre as condições de pirólise, como temperatura, tempo de residência e tipo de biomassa. Esta linha de pesquisa visa ajustar e aprimorar as propriedades do biochar de casca de cupuaçu de forma específica para atender às necessidades nutricionais e estruturais da cultura do açaí, garantindo a máxima eficácia e reprodutibilidade.

Por fim, é crucial a realização de estudos detalhados de Análise de Ciclo de Vida (ACV) e viabilidade econômica. Tais análises permitirão quantificar de maneira robusta os custos e benefícios ambientais, além de avaliar a sustentabilidade da adoção do biochar proveniente de resíduos amazônicos em escala comercial. Os resultados obtidos servirão como subsídio essencial para a formulação de políticas públicas eficazes e para a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e economicamente viáveis na Amazônia.

REFERENCIAS

AGARWAL, H.; KASHYAP, V. H.; MISHRA, A.; BORDOLOI, S.; SINGH, P. K.; JOSHI, N. C. Biochar-based fertilizers and their applications in plant growth promotion and protection. **3 Biotech**, v. 12, n. 6, p. 136, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007>.

ALONSO, R. S.; SODRÉ, G. A.; SILVA, D. C. Dickson quality index of cocoa genotypes under water deficit. **Forests**, v. 15, n. 12, n. 2054, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f15122054>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ANTONANGELO, J. A.; SUN, X.; EUFRATE-JUNIOR, H. J. Biochar impact on soil health and tree-based crops: a review. **Biochar**, v. 7, p. 51, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00450-6>. Acesso em: 25 ago. 2025.

BANIK, C.; BAKSHI, S.; LAIRD, D. A.; SMITH, R. G.; BROWN, R. C. Impact of biochar-based slow-release N-fertilizers on maize growth and nitrogen recovery efficiency. **Journal of Environmental Quality**, [S. l.], 24 fev. 2023. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jeq2.20468>. Acesso em: 26 ago. 2025.

BARTLETT, M. S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 160, n. 901, p. 268–282, May 1937. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109>. Acesso em: 08 jul. 2025.

CONG, M.; HU, Y.; SUN, X.; YAN, H.; YU, G.; TANG, G.; CHEN, S.; XU, W.; JIA, H. Long-term effects of biochar application on the growth and physiological characteristics of maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, n. 1172425, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1172425>. Acesso em: 26 ago. 2025.

DIAS, Y. N.; PEREIRA, W. V. S.; CALDEIRA, C. F.; RAMOS, S. J.; SOUZA, E. S.; RIBEIRO, P. G.; FERNANDES, A. R. Açaí seed biochar-based phosphate fertilizers for improving soil fertility and mitigating arsenic-related impacts from gold mining tailings: synthesis, characterization, and lettuce growth assessment. **Minerals**, v. 14, n. 7, p. 732, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min14070732>. Acesso em: 25 ago. 2025.

DICKSON, A.; LEAF, A.; HOSNER, J.F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forest Chronicle**, West Mattawa, v. 36, p. 10-13, 1960.

FERREIRA, J. C. C.; SANTOS, A. B. P.; RIBEIRO, R. P.; RIBEIRO, H. M. S.; AOKI, R. B.; OLIVEIRA, D. M.; FALCÃO, N. P. S. Biochar and Aniba rosaeodora fertilizer. **Bosque**, Viçosa, v. 45, n. 2, p. 295-306, 2024.

GHAEDI, M.; BIJANZADEH, E.; BEHPOURI, A.; NAJAFI-GHIRI, M. Biochar application affected biochemical properties, yield and nutrient content of safflower under water stress. **Scientific Reports**, v. 14, n. 20228, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71131-w>. Acesso em: 26 ago. 2025.

HEDLEY, C. The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 1, p. 12-19, 2015.

HUNT, R. **Plant growth curves: the functional approach to plant growth analysis**. London: Edward Arnold, 1982. 248 p.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. [S. l.]: Routledge, 2015.

LI, S.; WANG, N.; CHEN, S.; SUN, Y.; LI, P.; TAN, J.; JIANG, X. Enhanced soil P immobilization and microbial biomass P by application of biochar modified with eggshell. **Journal of Environmental Management**, v. 345, p. 118568, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118568>. Acesso em: 25 ago. 2025.

LIAO, J.; LIU, X.; HU, A.; SONG, H.; CHEN, X.; ZHANG, Z. Effects of biochar-based controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen-use efficiency of oilseed rape (*Brassica napus* L.). **Scientific Reports**, v. 10, n. 11063, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-67528-y>. Acesso em: 26 ago. 2025.

MA, G.; SHI, Q.; WU, Y.; LIU, Y.; HAN, L.; HU, J.; MAO, H.; ZUO, Z. Effects of biochar on the growth and physiological and mechanical properties of cucumber plug seedlings before and after transplanting. **Agriculture**, v. 14, n. 11, n. 2012, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14112012>. Acesso em: 26 ago. 2025.

MANZOOR, S.; HABIB-UR-RAHMAN, M.; HAIDER, G.; GHAFOR, I.; AHMAD, S.; AFZAL, M.; NAWAZ, F.; IQBAL, R.; YASIN, M.; TANVEER-UL-HAQ; DANISH, S.; GHAFAR, A. Biochar and slow-releasing nitrogen fertilizers improved growth, nitrogen use, yield, and fiber quality of cotton under arid climatic conditions. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 13742–13755, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16576-6>. Acesso em: 26 ago. 2025.

MURTAZA, G.; USMAN, M.; IQBAL, J.; TAHIR, M. N.; ELSHIKH, M. S.; ALKAHTANI, J.; TOLEIKIENĖ, M.; IQBAL, R.; AKRAM, M. I.; GRUDA, N. S. The impact of biochar addition on morpho-physiological characteristics, yield and water use efficiency of tomato plants under drought and salinity stress. **BMC Plant Biology**, v. 24, p. 356, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05058-9>. Acesso em: 25 ago. 2025.

ONG, K. A.; OWUSU, S.; DARKO, R. O.; HANYABUI, E.; ABBEY, A. N. A.; TETTEH, D. A. Effect of biochar application rates on soil properties and plant growth: the case of *Amaranthus caudatus*. **Journal of Environmental Management**, v. 3, n. 21, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00172-0>. Acesso em: 26 ago. 2025.

RSTUDIO TEAM. **RStudio**: Integrated Development Environment for R. Boston: Posit Software, PBC, 2024. Disponível em: <https://www.rstudio.com/>. Acesso em: 25 ago. 2025.

RUFINO, C. P. B. **Biocarvão na composição de substrato e adubação para a produção de mudas de açaizeiro-solteiro**. 2025. 84 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2025.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 30, n. 3, p. 507–512, set. 1974.

SHAPIRO, S. S. An analysis of variance test for normality (Complete Samples). **Biometrika**, Oxford, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, dez. 1965. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2333709>. Acesso em: 08 jul. 2025.

SHEFFIELD, S. B.; HOEFER, T. A.; PETERSEN, J. E. Biochar has positive but distinct impacts on root, shoot, and fruit production in beans, tomatoes, and willows. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, article 1346529, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1346529>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. Ames: Iowa State University Press, 1948. 503 p.

SOUSA FILHO, I. M. R. de; SANTOS, C. A. A. de; PAULINO, G. de S.; ARAÚJO, A. J. C.; SOUSA, W. L. de; ALVES, H. de S.; VIEIRA, T. A.; LUSTOSA, D. C. Characterization of Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) Waste for Substrate in Seedling Production. **Agriculture**, v. 15, n. 8, p. 870, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15080870>. Acesso em: 26 ago. 2025.

TUKEY, J. W. Comparing individual means in the analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v. 5, n. 2, p. 99-114, Jun. 1949. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/3001913>. Acesso em: 08 jul. 2025.

UCHÔA, W. S.; SANTOS NETO, J. E.; SOUZA, E. M.; SANTOS, D. M.; SOARES, N. C.; JOSÉ, J. V. Classificação climática de Köppen no estado do Acre. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS NA AMAZÔNIA SUL OCIDENTAL, 3., 2024, Cruzeiro do Sul. **Anais...** Cruzeiro do Sul: Universidade Federal do Acre – Campus Floresta, 2024. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/iiiscaamazonia/843524-classificacao-climatica-de-koppen-no-estado-do-acre>. Acesso em: 25 ago. 2025.

YANG, Y.; AHMED, W.; WANG, G.; YE, C.; LI, S.; ZHAO, M.; ZHANG, J.; WANG, J.; SALMEN, S. H.; WU, L.; ZHAO, Z. Transcriptome profiling reveals the impact of various levels of biochar application on the growth of flue-cured tobacco plants. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 655, 2024a. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05321-z>. Acesso em: 26 ago. 2025.

YANG, Y.; AHMED, W.; YE, C.; YANG, L.; WU, L.; DAI, Z.; KHAN, K. A.; HU, X.; ZHU, X.; ZHAO, Z. Exploring the effect of different application rates of biochar on the accumulation of nutrients and growth of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum*). **Frontiers in Plant Science**, v. 15, n. 1225031, 2024b. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1225031>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ZHANG, Z.; DONG, X.; WANG, S.; PU, X. Benefits of organic manure combined with biochar amendments to cotton root growth and yield under continuous cropping systems in Xinjiang, China. **Scientific Reports**, v. 10, n. 4718, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61118-8>. Acesso em: 26 ago. 2025.