



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - ICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - PPGAGRO

ENZA CRUZ BATISTA

**BORO E POTÁSSIO EM MUDAS DE AÇAIZEIRO: CRESCIMENTO, TROCAS
GASOSAS E DIAGNOSE VISUAL**

BELÉM
2026

ENZA CRUZ BATISTA

**BORO E POTÁSSIO EM MUDAS DE AÇAIZEIRO: CRESCIMENTO, TROCAS
GASOSAS E DIAGNOSE VISUAL**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, como parte das exigências do curso de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração: Manejo e Conservação de Recursos Ambientais, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Junior

**BELÉM
2026**

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

- B333b Batista, Enza Cruz
Boro e potássio em mudas de açaizeiro: crescimento, trocas gasosas e diagnose visual / Enza Cruz Batista. - 2026.
65 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Agronomia (PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2026.
Orientador: Prof. Dr. Mario Lopes da Silva Júnior
1. interação nutricional. 2. nutrição mineral de plantas. 3. fruticultura amazônica. 4. fertilidade do solo. 5. Euterpe oleracea. I. Silva Júnior, Mario Lopes da, *orient.* II. Título

ENZA CRUZ BATISTA

**BORO E POTÁSSIO EM MUDAS DE AÇAIZEIRO: CRESCIMENTO, TROCAS
GASOSAS E DIAGNOSE VISUAL**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, como parte das exigências do curso de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração: Manejo e Conservação de Recursos Ambientais, para obtenção do título de Mestre.

Data: 27/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MARIO LOPES DA SILVA JUNIOR**
Data: 10/10/2026 08:17:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Junior
Orientador/Presidente
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Documento assinado digitalmente
 **BRUNA SAYURI FUJIIYAMA VALENTE**
Data: 09/10/2026 09:49:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Bruna Sayuri Fujiyama Valente - 1º examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO CEZAR MEDEIROS SALDANHA**
Data: 06/10/2026 15:57:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Medeiros Saldanha - 2º examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Documento assinado digitalmente
 **SILVIO JUNIO RAMOS**
Data: 03/10/2026 08:05:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Silvio Junio Ramos - 3º examinador
Instituto Tecnológico Vale - ITV

Para a minha mãe, Ilza Franco da Cruz, aos meus irmãos Valdo Cruz Batista e Rosângeli Cruz Batista.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), pela oportunidade concedida para a realização do curso de mestrado.

À Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA), pela concessão da bolsa de estudos, a qual foi fundamental para a realização deste trabalho.

À empresa Rio Tinto, pelo apoio financeiro na realização do experimento, por meio do Projeto *Adubação boratada e seus efeitos no estado nutricional, na fisiologia e em variáveis agronômicas de cacaueteiro, dendezeiro, coqueiro e açazeiro em solos amazônicos*.

Ao Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Júnior, pela orientação, paciência, compreensão e dedicação ao longo do desenvolvimento deste projeto, contribuindo de forma essencial para sua concretização.

À Profa. Dra. Vania Melo, pelo acolhimento, amizade e orientação, que foram de grande importância durante essa trajetória acadêmica.

À minha mãe, Ilza Franco da Cruz, por ser minha maior inspiração e o principal motivo da minha dedicação, pelo amor, apoio e incentivo incondicionais. Aos meus irmãos, a quem amo profundamente.

Ao meu companheiro, Me. Willian Oliveira de Carvalho, pelo incentivo, amor, compreensão e apoio constantes durante todo o processo de realização deste trabalho.

A todos os amigos Me. Victor Rodrigues Dias, Me. Márcio Gerdhanes Martins Guedes, Ma. Dandara Lima de Souza, Paula Vanessa Correa Pinto, João Matheus de Castro, Matheus Duarte, Ana Flávia Lopes, Hiago Alves, Paulo André da Silva Moy, Rhyann Moraes Sales de Souza, Renan da Silva Nascimento, Natália de Paula, Emily Almeida, Gabriel Moura, Ingrid Samara Silva, Blenyele Goes, Luan Yuri Antunes, Thiago Martins, Juliane Silva e Mateus Augusto, pela ajuda, parceria e dedicação ao longo de todo o experimento.

Aos amigos Marcos Antônio Viana e Miguel Gabriel, por compartilharem comigo, desde o início, os desafios de viver longe de nossas terras e de nossas famílias em busca de um futuro melhor.

Aos amigos Yan Nunes e Flávio Rodrigues, por estarem sempre disponíveis para ajudar quando necessário.

Aos professores Denmora Gomes Araújo, por permitir a utilização do laboratório de sementes sempre que precisei, e Cecílio Frois Caldeira Jr., por disponibilizar o equipamento IRGA durante a condução do experimento e pela constante disposição em ajudar.

Ao amigo Victor Rodrigues Dias, pela disponibilidade em auxiliar nas análises dos dados do experimento e, sobretudo, pela amizade. Ao amigo Márcio Guedes, por sempre ter uma palavra de conforto e motivação para todos ao seu redor.

Ao grupo GEQSAS, pelo acolhimento e pelos bons momentos vivenciados ao longo dessa jornada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGAGRO-UFRA) e docentes do programa, por terem me proporcionado valiosos ensinamentos.

À secretária do programa, a Nena, pela humanidade e gentileza.

Aos meus queridos professores da graduação da Universidade Federal do Pará (UFPA), pelos ensinamentos transmitidos e pelas valiosas lições de vida.

À Universidade Federal Rural da Amazônia, por ter sido a “minha casa” por mais de 2 anos.

Por fim, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa, meus sinceros agradecimentos.

LISTA DE ABREVIATURAS

A - Assimilação líquida de CO₂
AIA - Ácido indolilacético
AFT - Área Foliar Total
AP - Altura de plantas
B - Boro
Ca - Cálcio
CC - Circunferência do Coleto
Ci/Ca - CO₂ interno e ambiente
CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento
CPHLA - CLOROFILA A
CPHLB - CLOROFILA B
CPHLT - CLOROFILA TOTAL
CTC - Capacidade de Troca de Cátions
DAT - Dias após o transplântio
E - Transpiração E
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EROS - Espécies reativas de oxigênio
FAPESPA - Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas
gs - Condutância estomática
K - Potássio
KCl - Cloreto de potássio
Mg - Magnésio
MSE - Massa seca estipe
MSF - Massa seca foliar
MSR - Massa seca raiz
NC - Necessidade de calcário
NF - Número de folhas
NFP - Número de folhas
P - Fósforo
RPPA - Razão Raiz: Parte Aérea
VR - Volume de Raiz

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Parâmetros de trocas gasosas em mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) submetidas a doses de K e B: assimilação líquida de CO₂ — A (A), condutância estomática — gs (B) e taxa de transpiração — E (D) em resposta a doses de K e razão entre carbono interno e ambiente — Ci/Ca (C) em resposta a doses de B. A linha vermelha tracejada (---) indica o ponto de mínimo estimado pelo modelo matemático dentro do intervalo experimental 35

Figura 2- Circunferência do coleto — (CC) de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) em resposta a doses de B. A linha de regressão representa o ajuste do modelo quadrático aos dados observados, com ponto de máximo estimado em 0,0012 g dm⁻³ de B. A linha vermelha tracejada (--) indica o ponto de máximo estimado pelo modelo matemático dentro do intervalo experimental 37

Figura 3- Parâmetros de biomassa e morfologia radicular em mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) em resposta a doses de B: massa seca de raízes — MSR (A) e volume radicular — VR (B). As linhas de regressão representam o ajuste dos modelos quadráticos aos dados observados, a linha vermelha tracejada (--) indica o ponto de máximo estimado pelo modelo matemático dentro do intervalo experimental 39

Figura 4- Sintomas visuais de deficiência de B em mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivadas em Latossolo Amarelo de textura média e submetidas a diferentes combinações de doses de B e K (g dm⁻³). Alterações morfológicas típicas da deficiência de B em tecidos jovens, incluindo má formação e enrugamento foliar (a, c), aspecto de “espinha de peixe” (e), folíolos fundidos (f), crescimento reduzido e estreitamento das folhas (g, j), fragilidade e quebra do pecíolo foliar (d), rachaduras na base do estipe (h), morte do meristema apical com comprometimento da emissão foliar (i) e escurecimento seguido de necrose radicular (b)..... 42

Figura 5- Sintomas visuais de deficiência de K em mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivadas em Latossolo Amarelo de textura média e submetidas a diferentes combinações de doses de B e K (g dm⁻³). Observam-se necrose e ressecamento na base do estipe, associados ao comprometimento do sistema radicular (A); clorose e despigmentação foliar acompanhadas de maior fragilidade e quebra das folhas (B, F); aspecto seco, redução do crescimento e estreitamento do limbo foliar (C); enfraquecimento e ressecamento do pecíolo, com desfolha prematura (D); clorose marginal evoluindo para necrose nas extremidades do limbo foliar (B, E); e pontuações necróticas distribuídas ao longo das folhas, associadas à intensa descoloração foliar (F)..... 45

Figura 6- Registros da ocorrência de mosca-branca (*Alleurodicus cocois*) em mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivadas em Latossolo Amarelo de textura média e submetidas a diferentes combinações de doses de B e K (g dm⁻³). Observam-se colônias de adultos e ninfas na face abaxial das

folhas, associadas à presença de secreções cerosas sobre a superfície foliar (A, B). As imagens correspondem aos tratamentos B0K1 (A) e B2K0 (B)..... 47

Figura 7- Sintomas visuais de toxidez por B em mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivadas em Latossolo Amarelo de textura média e submetidas a diferentes combinações de doses de B e K (g dm^{-3}). Observam-se clorose e necrose marginal com queima das extremidades foliares (a, b, c), manchas pardas e pontuações necróticas internervais (a, d), bem como enrugamento, encurvamento e ressecamento das lâminas foliares (a, c, e, f), característicos de condições de excesso de B. 49

Figura 8- Registros visuais de sintomas compatíveis com toxidez por K em mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivadas em Latossolo Amarelo de textura média e submetidas a diferentes combinações de doses de B e K (g dm^{-3}). Observam-se clorose, necrose e queima das extremidades foliares (A), além de manchas necróticas alongadas e necrose marginal em folhas mais velhas (B), associadas às maiores doses de KCl..... 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Caracterização de substrato a partir de Latossolo Amarelo, coletado da camada 0-20 cm, em Belém-PA	27
Tabela 2- Descrição dos tratamentos combinando doses de boro (B) e potássio (K ₂ O) em mudas de açaí (E. oleracea) variedade BRS Pai D'égua.....	30
Tabela 3- Resumo da análise de variância (ANOVA) das variáveis de crescimento e trocas gasosas de mudas de açaizeiro cultivadas em Latossolo Amarelo submetidas a diferentes doses de B e K. Valores correspondem aos níveis de significância (p-valor) para os efeitos de Bloco, B, K e interação B×K. Nas variáveis Assimilação líquida de CO ₂ — (A), Condutância estomática — (gs), CO ₂ interno e ambiente — (Ci/Ca), Transpiração — (E), Clorofila Total — (CPHLT), Clorofila-a — (CPHLA), Clorofila-b — (CPHLB), Altura de plantas — (AP), Circunferência do coleto — (CC), Numero de folhas — (NF), Numero de folíolos por planta — (NFP), Massa seca foliar — (MSF), Massa seca raiz — (MSR), Massa seca do estipe — (MSE), Volume de Raiz — (VR), Área Foliar Total — (AFT), Razão Raiz: Parte Aérea — (RPPA)	34

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	12
REFERÊNCIAS	16
2. INTRODUÇÃO.....	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1. Caracterização do substrato utilizado.....	26
3.2. Instalação e condução do experimento.....	28
3.3. Análises estatísticas.....	31
3.4. Variáveis avaliadas	31
3.4.1. Trocas gasosas	31
3.4.2. Estimativas de Clorofila Total, Clorofila a e b.....	32
3.4.3. Parâmetros de crescimento morfológico	32
3.4.4. Medidas de Biomassa e raízes	32
3.4.5. Sintomas de deficiência e toxidez de B e K em mudas de açaizeiro	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. Análise de variância (ANOVA).....	33
4.2. Trocas gasosas	34
4.3. Parâmetros de crescimento morfológico.....	37
4.4. Medidas de biomassa e raízes	38
4.5. Sintomas de deficiência e toxidez de B e K em mudas de açaizeiro	41
4.5.1. Sintomas de deficiência de B.....	41
4.5.2. Sintomas de deficiência de K.....	44
4.5.3. Sintomas de toxidez de B.....	48
4.5.4. Sintomas de toxidez de K.....	51
5. CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS	54

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira cespituosa da família Arecaceae, capaz de gerar perfilhos em sua base. Seu nome científico faz alusão a sua preferência por ambientes alagados, e sua origem está associada ao estuário do rio Amazonas (Oliveira, 2017; Oliveira; Farias Neto; Pena, 2007). Diversos produtos são obtidos dessa palmeira, com destaque para o palmito e o açaí, sendo este último seu fruto, na forma de drupa globosa, cuja polpa de coloração violácea, envolve a semente (Oliveira, 2017; Nascimento, 2008).

Na Amazônia, o açaí representou por muito tempo, juntamente da farinha de mandioca, a base alimentar dos povos tradicionais, exercendo forte impacto socioeconômico e cultural, sendo consumido principalmente na forma de bebidas a partir da polpa (Oliveira *et al.* 2000). Nas últimas décadas o cultivo do açaizeiro tornou-se muito importante economicamente para os estados da região Norte do Brasil, ao passo que o aumento da demanda por novos mercados impulsionou o crescimento das áreas de cultivo. Nesse cenário, novos desafios surgem à medida que a cultura deixa de ter predomínio extrativista, e passa a ser cultivada também em solos de terra firme (Santana *et al.* 2008; Macía *et al.* 2011; Matos *et al.* 2017).

Essa transição se tornou possível a partir do desenvolvimento de variedades adaptadas para estas novas condições: Enquanto anteriormente a planta levava aproximadamente cinco anos para início de sua produção, atualmente, com o uso de cultivares melhoradas e práticas de manejo adequados, a produção se inicia por volta de três a quatro anos de idade (Oliveira; Farias Neto; Quiroz, 2004; Farias Neto, 2019). No entanto, para a obtenção de cultivos sustentáveis é fundamental que se disponha de mudas de boa qualidade. Para isso são necessários uma série de cuidados, dentre eles, o manejo nutricional adequado à cultura e ao estágio de desenvolvimento (Oliveira *et al.* 2014; Bezerra, *et al.* 2020).

No entanto, apesar dos avanços já alcançados no conhecimento sobre a cultura, ainda são escassas as fontes de orientação técnica relacionadas ao manejo nutricional do açaizeiro, levando muitos produtores a adotarem práticas baseadas em conhecimentos empíricos. Tornando-se um obstáculo ao alcance do máximo potencial produtivo, muitas vezes resultando em desordens nutricionais decorrentes tanto do excesso quanto da deficiência de nutrientes (Viegas *et al.* 2008; Cunha *et al.* 2014; Lindolfo, 2017). Nesse contexto, a falta de conhecimento das necessidades nutricionais do açaizeiro constitui um dos principais entraves para o aumento da produção e a melhoria da qualidade de mudas e do açaí produzido em terra firme.

Entre os micronutrientes, o boro (B) destaca-se por estar entre as deficiências mais comuns na cultura, assim como em outras palmeiras da família Arecaceae (Viégas *et al.* 2008; Viégas *et al.* 2009). Esse elemento está relacionado a inúmeros processos fisiológicos nas

plantas e que são afetados pela sua deficiência, como transporte de açúcares, síntese da parede celular, lignificação, metabolismo de carboidratos, metabolismo do RNA, metabolismo de fitormônios, entre outras diversas funções (Cakmak; Romheld, 1997), além disso, o B é insistentemente apontado como o micronutriente cujas faixas entre deficiência e toxidez são muito estreitas (Brdar-Jokanovic, 2020), embora, de acordo com Yamada (2000), essa afirmação ainda careça de comprovação consistente na literatura, evidenciando lacunas quanto sua dinâmica no solo e na planta.

O potássio (K), por sua vez, é um dos elementos mais exigidos pelas culturas, especialmente por palmeiras. Atua em funções essenciais, participando de processos osmóticos, da síntese de proteínas, da abertura e fechamento de estômatos, da permeabilidade da membrana, do controle do pH e da ativação de cerca de 60 sistemas enzimáticos de elevada importância no metabolismo das plantas (Malavolta *et al.* 1997; Ferreira *et al.* 2008). Sua deficiência é associada à redução do crescimento e até à mortalidade em palmeiras ornamentais (Broschat, 2005; Broschat, 2009). Embora, a toxidez por K seja menos relatada, altas concentrações desse nutriente podem causar interferências na absorção de cálcio (Ca) e magnésio (Mg), resultando em deficiências secundárias desses nutrientes (Malavolta *et al.* 1997; Fageria, 2001).

Apesar de desempenharem funções distintas, a carência de B e K pode afetar diretamente processos fundamentais, como divisão celular, regulação estomática e formação de tecidos, que impactam o desenvolvimento e a produtividade das culturas (Marschner, 2012; Reis *et al.* 2008). Ainda que a literatura relate com maior frequência interações do B com nutrientes como Ca, P e Fe (Prado; Natale; Rozane, 2006), evidências indicam que a relação entre B e K também exerce influência sobre o crescimento do açaizeiro (Veloso *et al.* 2009; Fageria, 2001). Embora existam indícios que apontem relação entre esses nutrientes, ainda são escassos estudos que avaliem de forma integrada os mecanismos envolvidos e os efeitos da interação de B e K sobre o crescimento e a fisiologia das plantas, especialmente do açaizeiro (Fageria, 2001; Boaretto *et al.* 2004; Quaggio; Mattos; Boaretto, 2011).

Somado a isso, o baixo uso de fertilizantes e corretivos é uma realidade na região Norte, e está associado a fatores como o elevado custo, a falta de tradição no uso e limitações na infraestrutura de armazenamento até o momento da aplicação (Homma; Rebello, 2020). Do mesmo modo, a utilização de micronutrientes ainda é pouco praticada, especialmente de B, que Viegas *et al.* (2008) aponta como limitante ao crescimento do açaizeiro. Além da utilização de fertilizantes, a escolha da fonte adotada é determinante para a eficiência da adubação, uma vez

que diferentes fertilizantes apresentam variações quanto à solubilidade, à velocidade de liberação e ao efeito residual no solo: Fontes de liberação lenta tendem a reduzir as perdas por lixiviação e prolongar a disponibilidade do nutriente ao longo do ciclo, em comparação às fontes altamente solúveis (Silva *et al.* 2018).

No caso do B, cuja mobilidade é baixa em maioria das culturas, torna-se necessária a absorção de forma contínua, ao longo do ciclo da cultura, o que justifica o uso crescente de fontes com menor solubilidade, menos suscetíveis a perdas por lixiviação (Hansel; Oliveira, 2016). Nesse contexto, o tetraborato de sódio pentahidratado (Granubor) destaca-se como uma fonte sólida que, embora apresente boa solubilidade em água, possui taxa de liberação gradual do nutriente, e teor de B de 15% (Rio Tinto, 2024). Para o K, apesar da existência de diversas fontes disponíveis, o cloreto de potássio é certamente a fonte mais utilizada por sua alta concentração e baixo custo (Ferreira; Cravo; Ferreira, 2020). Contudo, a aplicação de altas doses de KCl, além de favorecer maiores perdas por lixiviação em solos arenosos, pode causar efeito salino, em função do Cl (Ferreira; Cravo; Ferreira, 2020).

A mobilidade dos nutrientes nas plantas varia de acordo com as funções que esses elementos exercem no metabolismo vegetal (Malavolta *et al.* 1997): Cerca de 90% do B presente nas plantas encontra-se fixado na parede celular, e por essa razão, possui baixa mobilidade na maioria das espécies (Brown; Shelp, 1997; Abou seeda *et al.* 2021). Enquanto o K, essencial para o equilíbrio osmótico nas células, é altamente móvel. Logo, os sintomas de deficiência e toxidez refletem a dinâmica desses elementos na planta, manifestando-se visivelmente por meio de alterações fisiológicas, metabólicas e por fim, morfológicas que limitam o desenvolvimento da cultura. Em vista disso, a diagnose visual é uma técnica que se baseia na caracterização e comparação desses sintomas com padrões descritos na literatura (Fontes, 2001; Ramos, 2006). Para o açaizeiro, entretanto, ainda são escassos os estudos voltados à caracterização desses fenômenos, destacando-se os trabalhos de Viegas *et al.* (2008) e Silva *et al.* (2025).

Nesse âmbito, a necessidade de se aprofundar os conhecimentos sobre o manejo nutricional do açaizeiro torna-se ainda mais evidente, especialmente em sistemas de cultivo em solos tropicais, nos quais há forte dependência do uso de fertilizantes e corretivos agrícolas, que com uma limitada base de informações científicas, acarreta medidas inadequadas por parte dos produtores. A falta de orientação técnica quanto a elementos como o B, que exige fornecimento criterioso devido o desconhecimento sobre sua real necessidade pela cultura, especialmente nas fases iniciais, somado à limitada compreensão de sua interação com outros nutrientes, em

particular com o K em culturas perenes. Torna-se ainda mais limitante em frutíferas tropicais como o açaizeiro, nas quais os estudos sobre nutrição mineral, os efeitos na fisiologia, crescimento e sintomatologia, ainda são pouco abordados, apesar da reconhecida importância destes fatores à qualidade das mudas e sucesso produtivo.

Estudos conduzidos em ambiente protegido permitem maior controle das variáveis experimentais, possibilitando avaliar com maior precisão os efeitos isolados e combinados dos nutrientes. Com isso, o objetivo deste estudo é analisar os efeitos da interação entre B e K sobre o crescimento biométrico, a fisiologia, o acúmulo de biomassa e a expressão de sintomas visuais de deficiência e toxidez em mudas de açaizeiro cultivadas em ambiente protegido, utilizando como fontes de nutrientes para o B o tetraborato de sódio pentahidratado (Granubor ®), combinado ao Cloreto de potássio (KCl).

REFERÊNCIAS

- ABOU SEEDA, M. A.; ABOU EL-NOUR, E. A. A.; YASSEN, A. A.; HAMMAD, S. A. Boron, structure, functions and its interaction with nutrients in plant physiology: a review. **Middle East Journal of Agriculture Research**, v. 10, n. 1, p. 117-179, 2021. DOI: 10.36632/mejar/2021.10.1.9.
- BARBOSA, Z.; SOARES, I.; CRISÓSTOMO, L. A. Crescimento e absorção de nutrientes por mudas de gravioleira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 519-522, dez. 2003. DOI: 10.1590/S0100-29452003000300039.
- BEZERRA, J. L. S.; ANDRADE NETO, R. C.; LUNZ, A. M. P.; ARAÚJO, J. M.; ARAÚJO, C. S. Produção de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea*) em resposta a diferentes fontes e doses de potássio. **Enciclopédia Biosfera**, v. 17, n. 33, p. 348-360, 2020. DOI: 10.18677/EnciBio_2020C31.
- BOARETTO, A. E.; BOARETTO, R. M.; CONTIN, T. L. M.; MURAOKA, T. É móvel ou imóvel o boro em laranjeira? **Laranja**, Cordeirópolis, v. 25, n. 1, p. 195-208, 2004.
- BOVI, M. L. A.; GODOY JUNIOR, G.; SPIERING, S. H. Respostas de crescimento da pupunheira à adubação NPK. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 1, p. 161-166, 2002. DOI: 10.1590/S0103-90162002000100023.
- BRDAR-JOKANOVIC, M. Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 4, p. 1424, 2020. DOI: 10.3390/ijms21041424.
- BROSCHAT, T. K. **Nutrient deficiencies of landscape and field-grown palms in Florida**. Gainesville: University of Florida, IFAS Extension, 2005. (ENH1018/EP273). DOI: 10.32473/edis-ep273-2005.
- BROSCHAT, T. K. Palm nutrition and fertilization. **HortTechnology**, v. 19, n. 4, p. 690-694, 2009. DOI: 10.21273/HORTSCI.19.4.690.
- BROWN, P. H.; SHELP, B. J. Boron mobility in plants. **Plant and Soil**, v. 193, n. 1-2, p. 85-101, 1997. DOI: 10.1023/A:1004211925160.
- BROWN, P. H.; ZHAO, F. J.; DOBERMANN, A. What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. **Plant and Soil**, v. 476, p. 11-23, 2022. DOI: 10.1007/s11104-021-05171-w.
- CAKMAK, I.; RÖMHELD, V. Boron deficiency-induced impairments of cellular functions in plants. **Plant and Soil**, v. 193, n. 1-2, p. 71-83, 1997.
- CUNHA, J. F.; FRANCISCO, E. A. B.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira – 2009 a 2012. **Informações Agronômicas**, n. 145, p. 1-13, 2014.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Zoneamento edafoclimático do Estado do Pará para a cultura do açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.)**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002.

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001. DOI: 10.1081/PLN-100106981.

FARIAS NETO, J. T. de. **BRS Pai d'Égua: cultivar de açaí para terra firme com suplementação hídrica**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2019. 7 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado técnico, 317).

FERREIRA, C. P.; CRAVO, M. S.; FERREIRA, E. V. O. Fertilizantes minerais. In: **RECOMENDAÇÕES de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 73.

FERREIRA, E. A.; MENDONÇA, V.; SOUZA, H. A. de; RAMOS, J. D. Adubação fosfatada e potássica na formação de mudas de tamarindeiro. **Scientia Agraria**, v. 9, n. 4, p. 475-480, 2008. DOI: 10.5380/rsa.v9i4.12479.

FONTES, P. C. R. Diagnóstico do estado nutricional pelo método visual. In: FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa: Editora UFV, 2001. cap. 8, p. 63-86.

GAMA, J. R. V. et al. **Solos de várzea da Amazônia: características, classificação e potencial agrícola**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2005.

GONÇALVES, J. L. M.; VALERI, S. V. Micronutrientes para culturas: eucalipto e pinus. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. (ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p. 393-423.

HANSEL, F. D.; OLIVEIRA, M. L. de. Importância dos micronutrientes na cultura da soja no Brasil. **Informações Agronômicas**, n. 153, p. 1-9, 2016.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005. 515 p.

HOMMA, A. K. O.; REBELLO, F. K. Aspectos econômicos da adubação e da calagem na Amazônia. In: **RECOMENDAÇÕES de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 185.

LINDOLFO, M. M. **Produtividade e nutrição de açaizeiro irrigado em função de doses de boro no Nordeste Paraense**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2017.

LINDOLFO, M. M. et al. Productivity and nutrition of fertigated açaí palms according to boron fertilization. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 42, n. 2, e-601, 2020. DOI: 10.1590/0100-29452020601.

MACÍÁ, M. J. et al. Palm use in Northwestern South America: a quantitative review. **The Botanical Review**, v. 77, n. 4, p. 462-570, 2011. DOI: 10.1007/s12229-011-9086-8.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. rev. e atual. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. 672 p.

MATOS, C. B. et al. Economic profile of two species of genus *Euterpe*, producers of açai fruits, from the Pará and Amazonas States – Brazil. **International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology**, v. 2, n. 4, p. 1822-1828, 2017. DOI: 10.22161/ijeab/2.4.46.

MINAMI, K.; TESSARIOLI NETO, J.; PENTEADO, S. R.; ESCARPARI FILHO, J. A. **Produção de mudas hortícolas de alta qualidade**. Piracicaba: ESALQ/SEBRAE, 1994. 155p.

NASCIMENTO, W. M. O. **Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.)**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2008. 2 p. (Informativo Técnico Redes de Sementes da Amazônia, 18).

OLIVEIRA, M. S. P.; FARIAS NETO, J. T.; MATTIETTO, R. A.; MOCHIUTTI, S.; CARVALHO, A. V. **Açaí: *Euterpe oleracea***. IICA/PROCISUR, 2017. 31 p.

OLIVEIRA, M. S. P.; FARIAS NETO, J. T.; PENA, R. da S. **Açaí: técnicas de cultivo e processamento**. Fortaleza: Instituto Frutal, 2007. 104 p.

OLIVEIRA, M. do S. P. de; FARIAS NETO, J. T. de; QUEIROZ, J. A. L. de. Cultivo e manejo do açaizeiro para produção de frutos. In: ENCONTRO AMAZÔNICO DE AGRÁRIAS, 6., 2014, Belém, PA. **Atuação das ciências agrárias nos sistemas de produção e alterações ambientais: anais**. Belém, PA: UFRA, 2014.

OLIVEIRA, M. do S. P. de; LEMOS, M. A.; SANTOS, V. F. dos; SANTOS, E. O. dos. Correlações fenotípicas entre caracteres vegetativos e de produção de frutos em açaizeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 1-5, abr. 2000.

PRADO, R. M.; NATALE, W.; ROZANE, D. E. Níveis críticos de boro no solo e na planta para cultivo de mudas de maracujazeiro-amarelo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 305-309, 2006. DOI: 10.1590/S0100-29452006000200034.

QUAGGIO, J. A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M. Sources and rates of potassium for sweet orange production. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 3, p. 369-375, 2011. DOI: 10.1590/S0103-90162011000300015.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RAMOS, M. J. M. **Caracterização de sintomas de deficiência de macronutrientes e de boro em abacaxizeiro cultivar Imperial**. 2006. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2006.

REIS, C. J.; SORATTO, R. P.; BISCARO, G. A.; KULCZYNSKI, S. M.; FERNANDES, D. S. Doses e modos de aplicação de boro na produção e qualidade fisiológica de sementes de feijão em solo de cerrado. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 55, n. 4, p. 258-264, jul./ago. 2008.

RIO TINTO. **Ficha de dados do produto: tetraborato penta-hidratado (Granubor – 15% B).** 2024.

SANTANA, A. C.; CARVALHO, D. F.; MENDES, F. A. T. **Análise sistêmica da fruticultura paraense: organização, mercado e competitividade empresarial.** Belém: Banco da Amazônia, 2008. 255 p.

SILVA, A. L. P. et al. Avaliação do estado nutricional por meio de diagnose visual em açaizeiro sob cultivo sem solo na Amazônia. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 6, e15293, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n6-032.

SILVA, R. C.; BAIRD, R.; DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Slow and fast-release boron sources in potash fertilizers: spatial variability, nutrient dissolution and plant uptake. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 6, p. 1437-1448, 2018. DOI: 10.2136/sssaj2018.02.0065.

VELOSO, C. A. C. et al. Resposta do açaizeiro à aplicação de doses de boro, em relação a doses de potássio em Latossolo Amarelo do Nordeste Paraense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **O solo e a produção de bioenergia: perspectivas e desafios: resumos.** Fortaleza: SBCS, 2009. p. 199.

VIÉGAS, I. de J. M.; CRAVO, M. da S.; ARAUJO, S. M. B. Açaizeiro. In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de J. M. (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará.** 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. pt. 5, cap. 2, p. 323-325.

VIEGAS, 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, n. 50, p. 129-141, jul./dez. 2008.

VIÉGAS, I. de J. M.; MEIRELES, R. de O.; FRAZÃO, D. A. C.; CONCEIÇÃO, H. E. O. da. Avaliação da fertilidade de um Latossolo Amarelo textura média para o cultivo do açaizeiro no estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n. 52, p. 23-36, jul./dez. 2009.

YAMADA, T. Boro: será que estamos aplicando a dose suficiente para o adequado desenvolvimento das plantas? **Informações Agrônomicas**, n. 90, p. 1-5, 2000.

BORO E POTÁSSIO EM MUDAS DE AÇAIZEIRO: CRESCIMENTO, TROCAS GASOSAS E DIAGNOSE VISUAL

RESUMO

Nas últimas décadas, a cultura do açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) ganhou grande importância econômica para a região Norte do Brasil; contudo, informações sobre seu manejo nutricional ainda são escassas. O boro (B) destaca-se por estar entre as deficiências mais comuns na cultura, atuando na formação e estabilização da parede celular, com reflexos no crescimento vegetal. O potássio (K), por sua vez, atua no controle osmótico, na regulação estomática e no metabolismo celular. Objetivou-se avaliar as respostas fisiológicas, morfológicas, o acúmulo de biomassa e os sintomas de deficiência e toxidez em mudas de açaizeiro sob doses de B e K. O experimento foi conduzido em casa de vegetação no período de novembro de 2024 a maio de 2025, na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), campus Belém, PA. Utilizaram-se vasos de 8 L com substrato de Latossolo Amarelo de textura média e baixa fertilidade, ajustado para saturação por bases de 60%, contendo uma planta por vaso. O delineamento adotado foi o inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 4×4 . Como fontes de nutrientes, utilizaram-se o cloreto de potássio (KCl, 60% de K_2O) e o tetraborato penta-hidratado (Granubor, 15% de B), nas proporções de 0,1 (K0), 0,2 (K1), 0,3 (K2) e 0,4 (K3) $g\ dm^{-3}$ de K, e 0 (B0), 0,001 (B1), 0,002 (B2) e 0,003 (B3) $g\ dm^{-3}$ de B. A análise de variância revelou ausência de interação significativa ($p > 0,05$) entre B e K para todas as variáveis avaliadas. O K influenciou significativamente as trocas gasosas, promovendo reduções lineares na taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (g_s) e transpiração (E). Em contrapartida, o B influenciou de forma quadrática a razão C_i/C_a , a circunferência do coleto (CC), a massa seca de raiz (MSR) e o volume radicular (VR). A dose ótima técnica de B para a CC foi de $0,0012\ g\ dm^{-3}$, enquanto para MSR e VR situou-se em $0,0013\ g\ dm^{-3}$, mesma dose em que a razão C_i/C_a apresentou ponto de mínimo. O acentuado declínio nessas variáveis em doses elevadas demonstrou que o excesso por B é mais prejudicial ao crescimento do que a sua própria omissão. A diagnose visual permitiu caracterizar sintomas bem pronunciados: a deficiência de B causou folhas encarquilhadas, folíolos fundidos em “espinha de peixe”, rachaduras no estipe, além de engrossamento e necrose apical radicular. A deficiência de K manifestou-se em folhas velhas por meio de clorose e necrose marginal, desfolha precoce e suscetibilidade à mosca-branca. O excesso por B promoveu clorose e

queimaduras nas margens de folhas velhas, enquanto o excesso por K gerou lesões necrosadas e cloroses. Diante disso, faz-se necessária a adoção de medidas criteriosas no fornecimento de B e K na formação de mudas, dada a sensibilidade da espécie ao B e o risco de estresse osmótico decorrente de doses elevadas de KCl, recomendando-se novos estudos para compreender as exigências nutricionais do açaizeiro em diferentes fases fenológicas.

Palavras-chave: interação nutricional; nutrição mineral de plantas; fruticultura amazônica; fertilidade do solo; *Euterpe oleracea*; adubação.

BORON AND POTASSIUM IN AÇAÍ PALM SEEDLINGS: GROWTH, GAS EXCHANGE AND VISUAL DIAGNOSIS

ABSTRACT

In recent decades, the cultivation of the açai palm (*Euterpe oleracea* Mart.) has gained significant economic importance in Northern Brazil; however, information regarding its nutritional management remains scarce. B stands out as one of the most common nutrient deficiencies in this crop, playing a key role in cell wall formation and stabilization, with direct impacts on plant growth. K, in turn, acts in osmotic control, stomatal regulation, and cellular metabolism. This study aimed to evaluate the physiological and morphological responses, biomass accumulation, and visual symptoms of deficiency and toxicity in açai palm seedlings subjected to varying doses of B and K. The experiment was conducted in a greenhouse from November 2024 to May 2025 at the Federal Rural University of the Amazon (UFRA), Belém campus, Pará state, Brazil. Plants were grown individually in 8 L pots containing a medium-textured, low-fertility Yellow Oxisol (Xanthic Ferralsol) substrate, with base saturation adjusted to 60%. A completely randomized design (CRD) was adopted in a 4×4 factorial scheme. The nutrient sources used were potassium chloride (KCl, 60% K₂O) and disodium octaborate / pentahydrate tetraborate (Granubor, 15% B) at doses of 0.1 (K0), 0.2 (K1), 0.3 (K2), and 0.4 g dm⁻³ (K3) of K, and 0 (B0), 0.001 (B1), 0.002 (B2), and 0.003 g dm⁻³ (B3) of B. Analysis of variance revealed no significant interaction ($p > 0.05$) between B and K for any of the evaluated variables. K significantly influenced gas exchange, promoting linear reductions in net CO₂ assimilation rate (A), stomatal conductance (g_s), and transpiration rate (E). Conversely, B exerted a significant quadratic effect on the intercellular-to-ambient CO₂ concentration ratio (C_i/C_a), collar circumference (CC), root dry mass (RDM), and root volume (RV). The technical optimal B dose for CC was 0.0012 g dm⁻³, whereas for RDM and RV it was 0.0013 g dm⁻³—the same dose at which the C_i/C_a ratio reached its minimum point. The sharp decline observed in these variables at higher doses demonstrated that excess B is more detrimental to growth than B omission itself. Visual diagnosis allowed the characterization of distinct symptoms: B deficiency caused crinkled leaves, leaflets fused in a "fishbone" pattern, stipe cracking, as well as root apical thickening and necrosis. K deficiency manifested in older leaves as marginal chlorosis and necrosis, premature defoliation, and susceptibility to whitefly. Excess B induced marginal chlorosis and scorching on older leaves, whereas excess K caused

chlorosis and necrotic lesions. Careful management of B and K fertilization is required during seedling production due to the high sensitivity of the species to B and the risk of osmotic stress induced by high doses of KCl. Further studies are recommended to understand the nutritional requirements of the açaí palm across different phenological stages.

Keywords: nutritional interaction; plant mineral nutrition; Amazonian fruit production; soil fertility; *Euterpe oleracea*; fertilization.

2. INTRODUÇÃO

O suprimento das necessidades nutricionais em fase de muda é um dos fatores determinantes ao bom desempenho das plantas em campo (Oliveira *et al.* 2014; Sampaio *et al.* 2016). No entanto, a limitada disponibilidade de informações técnicas a respeito das exigências nutricionais para o açaizeiro tem levado muitos agricultores a adotarem práticas baseadas em conhecimentos empíricos, resultando em baixo desempenho no crescimento e produção da cultura (Faquin, 2002; Araujo, 2016). Entre os micronutrientes, o B (boro) se destaca por ser considerado um dos mais limitantes, cuja deficiência é frequentemente observada em palmeiras da família Arecaceae, incluindo o açaizeiro (Viegas *et al.* 2009).

O B participa de processos fundamentais, como a formação e integridade das paredes celulares, transporte de açúcares, desenvolvimento hormonal e equilíbrio nutricional com outros elementos, como N (nitrogênio), P (fósforo), Ca (cálcio) e K (potássio) (Abou seeda *et al.* 2021). Devido sua baixa mobilidade na maioria das espécies, o B tende a se acumular nos tecidos de maior transpiração, apresentando redistribuição limitada para órgãos jovens (Hu; Brown, 1997). Com isso, os sintomas da deficiência de B, comumente se manifestam primeiro em tecidos em desenvolvimento, causando inibição do crescimento do tecido meristemático, prejuízos à formação celular e às reações enzimáticas (Abou seeda *et al.* 2021).

Regularmente, plantas deficientes em B apresentam crescimento reduzido, deformações foliares e menor acúmulo de biomassa (Mengel; Kirkby, 2001; Brown; Hu, 1997; Lilay *et al.* 2024). Além disso, há relatos de redução nos teores de clorofila, proteínas solúveis e eficiência fotossintética, em função de perturbações na cadeia transportadora de elétrons e fotoinibição do fotossistema II (Cakmak; Römheld, 1997; Goldbach *et al.* 2007). Broschat, (2009) descreve os sintomas da deficiência B como muito variados em palmeiras, mesmo dentro de uma mesma espécie.

Um dos sintomas mais comuns da deficiência de B em palmeiras é a falha na abertura normal das folhas lanceoladas, com os folíolos firmemente fundidos em parte ou em toda a sua extensão (Broschat, 2009). Tão prejudicial quanto a deficiência, a toxicidade manifesta -se por sintomas como clorose e necrose nas extremidades foliares, desfolha, manchas nos frutos e, em casos severos, morte das plantas (Melnik *et al.* 2005; Abou seeda *et al.* 2021), alguns dos sintomas possuindo semelhanças até mesmo a deficiência de K.

O K, por ser o segundo elemento químico mais abundante no tecido vegetal, é considerado um dos nutrientes mais importantes para as palmeiras, sendo a sua deficiência uma das mais frequentes nesse grupo de plantas e, em alguns casos, letal para espécies ornamentais

(Broschat, 2005; Broschat, 2009). Além disso, é reconhecido como um dos nutrientes de maior contribuição para a sanidade vegetal (Pinheiro *et al.* 2011), desempenhando funções essenciais no metabolismo, como o aumento da espessura da parede celular em células epidérmicas, manutenção da rigidez dos tecidos, regulação do funcionamento estomático, ativação enzimática, síntese de proteínas e o controle do pH celular, além de auxiliar na recuperação de tecidos lesionados (Anda, 2001; Pinheiro *et al.* 2011).

Por sua alta mobilidade nas plantas, os sintomas de deficiência de K aparecem inicialmente em folhas mais velhas. Sob carência desse macronutriente, a hiperpolarização da membrana plasmática é a primeira resposta detectada, ocorrendo poucos minutos após uma diminuição significativa na concentração externa de K^+ , seguidas pela produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) e sinalização de etileno, que são respostas típicas à deficiência de K. A deficiência também desencadeia sinais de Ca^{2+} , após minutos de privação de K^+ , e após várias horas, ocorre a diferenciação de pelos radiculares mediadas pelos sinais de Ca^{2+} . Diversas outras interações hormonais também são ativadas durante a suficiência de K^+ , incluindo sinais de estresse via etileno, auxina, citocinina e ácido jasmônico (De Bang, *et al.* 2021).

O fornecimento inadequado de K tem uma série de efeitos negativos no crescimento e vigor das plantas, bem como na resistência a estresses ambientais como seca e salinidade (De Bang, *et al.* 2021). Os primeiros sintomas expressos em plantas deficientes de K são cloroses na ponta das folhas mais velhas, que rapidamente se transformam em necrose marginal, espalhando-se ao longo das margens da folha, alguns genes relacionados ao jasmonato são expressos nas folhas com deficiência, e podem promover a senescência foliar. Esses sintomas frequentemente aparecem juntamente com o bronzeamento, que se deve ao acúmulo de poliaminas (PAs), como a putrescina (Chen *et al.* 2019; De Bang *et al.* 2021).

No açazeiro, os sintomas descritos para a cultura incluem cloroses nas bordas das folhas mais velhas, em direção a nervura central, necroses nas bordas e ápices das folhas (Viegas *et al.* 2008). Quanto aos sintomas visuais da toxidez por K são pouco conhecidos, mas são comumente descritos como consequência de sua toxicidade indireta, tendo sido relatado que altas concentrações desse cátion pode causar antagonismo na absorção de Ca e Mg, resultando em deficiências secundárias desses nutrientes (Malavolta *et al.* 1997; Fageria, 2001).

Embora existam muitos estudos sobre a relação entre os nutrientes e crescimento vegetal, a literatura ainda apresenta um predomínio de abordagens restritas às análises químicas, frequentemente desvinculadas das análises fisiológicas que permitam interpretar os efeitos

nutricionais no metabolismo e desenvolvimento das plantas. Reid e Hayes (2005) e Haworth *et al.* (2018) ressaltam que análises fisiológicas são fundamentais para compreender o comportamento nutricional e o desempenho vegetal sob diferentes condições ambientais.

Outra ferramenta importante na avaliação nutricional é a diagnose visual, que é uma técnica que consiste na comparação entre os sintomas apresentados pela planta e padrões previamente descritos (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997). Representa importante método preliminar para identificação de desordens nutricionais em condições de campo, mas que ainda assim, não substitui as análises químicas. Entretanto, ainda são escassos os estudos envolvendo a caracterização visual de deficiências nutricionais em açaizeiro.

Diante do exposto, o presente estudo propõe-se a avaliar os efeitos da adubação com B e K sobre parâmetros fisiológicos, biométricos e sintomatologia visual de deficiência e toxidez em mudas de açaizeiro cultivadas em ambiente protegido. Parte-se da hipótese de que a adubação com B e K promove alterações significativas nos processos fisiológicos e no crescimento biométrico do açaizeiro, de modo que doses intermediárias favoreçam maior eficiência fotossintética e desenvolvimento vegetativo, enquanto condições extremas de deficiência ou excesso comprometam o metabolismo e o crescimento das mudas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do substrato utilizado

O substrato utilizado foi obtido a partir de amostras compostas da camada de 0 a 20 cm de um Latossolo Amarelo distrófico, coletado de um remanescente florestal localizado próximo a área experimental. A área possui altitude aproximada de 10 metros, com relevo plano. O procedimento de coleta foi realizado no período de agosto de 2024, que corresponde a estação com menor precipitação (Santos *et al.* 2016). Para a coleta, inicialmente ocorreu a limpeza da superfície do solo, com retirada da vegetação, galhos e pedras presentes, sem remoção da camada superficial do solo (Melém Júnior; Batista, 2012). Antes da montagem do experimento, foram retiradas quatro amostras do solo para caracterização química e física (Tabela 1), onde foram destorroadas, homogeneizadas, secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm, eliminando pedras, raízes e material orgânico não decomposto (Filizola; Gomes; Souza, 2006; Teixeira *et al.* 2017).

Tabela 1-Caracterização de substrato a partir de Latossolo Amarelo, coletado da camada 0-20 cm, em Belém-PA.

Variável	Unidade	Latossolo Amarelo
Argila	g kg ⁻¹	164,5
Silte	g kg ⁻¹	37
Areia	g kg ⁻¹	798,5
pH (H ₂ O)	-	4,6
P	mg dm ⁻³	3,3
S	mg dm ⁻³	8,5
K ⁺	cmol _c dm ⁻³	0,04
Ca ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0,22
Mg ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0,08
Al ³⁺	cmol _c dm ⁻³	1,21
H + Al ³⁺	cmol _c dm ⁻³	6,3
SB	cmol _c dm ⁻³	0,34
T	cmol _c dm ⁻³	6,62
t	cmol _c dm ⁻³	1,55
V	%	5,1
m	%	78,1
MO	g kg ⁻¹	18,3
B	mg dm ⁻³	0,22
Cu	mg dm ⁻³	0,25
Fe	mg dm ⁻³	74,5
Mn	mg dm ⁻³	0,9
Zn	mg dm ⁻³	0,09

A camada utilizada como substrato apresentou predomínio da fração areia (798,5 g kg⁻¹), com 164,5 g kg⁻¹ de argila e 37 g kg⁻¹ de silte, sendo classificado como franco-arenoso de acordo com o triângulo textural. O valor de pH em H₂O de 4,6 caracteriza o solo como fortemente ácido, com presença de alumínio trocável. A capacidade de troca de cátions a pH 7 (T = 6,62 cmol_c dm⁻³) indica baixa capacidade de retenção de nutrientes, como observado nos baixos teores de cátions essenciais de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺. A CTC efetiva (t = 1,55 cmol_c dm⁻³) foi classificada como muito baixa, enquanto a saturação por bases (V = 5,1%) evidencia a baixa fertilidade natural do substrato, com predominância de cargas ocupadas por H⁺ e Al³⁺. A

saturação por alumínio ($m = 78,1\%$) indica alto teor de Al, em nível potencialmente tóxico às plantas.

Esses resultados são condizentes com as características descritas para os Latossolos encontrados na Amazônia, os quais apresentam propriedades físicas favoráveis ao cultivo agrícola, porém consideráveis limitações químicas, tornando-os dependentes de manejo corretivo e fertilizantes (Tucci; Lima; Lessa, 2009; Brasil; Cravo; Viegas, 2020).

O teor de matéria orgânica ($18,3 \text{ g kg}^{-1}$) foi classificado como médio, sendo insuficiente para compensar a baixa CTC do solo, principalmente por se tratar de um solo com elevada proporção de areia. O teor de fósforo ($3,3 \text{ mg dm}^{-3}$) foi classificado como baixo para solos de textura arenosa, indicando deficiência acentuada desse nutriente. O teor de K, equivalente a $14,6 \text{ mg dm}^{-3}$, também foi classificado como baixo. Os micronutrientes B, Cu, Mn e Zn apresentaram teores baixos, enquanto o Fe ($74,5 \text{ mg dm}^{-3}$) apresentou teor elevado. Condição comum em solos tropicais altamente intemperizados (Brasil; Cravo; Viegas, 2020).

Em síntese, o solo apresenta predomínio na textura arenosa, elevada acidez, baixa CTC, baixa saturação por bases e alta saturação por alumínio, caracterizando um ambiente de muito baixa fertilidade natural. Com baixos teores de P, K, Ca, Mg e B, especialmente de B e K, conforme critérios do Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo e Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará (Sobral *et al.* 2015; Brasil; Cravo Viegas, 2020). Sendo, portanto, necessário manejo corretivo do solo por meio da calagem, visando a neutralização da acidez e a redução da toxidez por alumínio.

3.2. Instalação e condução do experimento

O experimento foi desenvolvido em condições de casa de vegetação no período de novembro de 2024 a maio de 2025, na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), campus Belém, PA, situado nas coordenadas $48^{\circ}26'07'' \text{ W}$ e $1^{\circ}27'07'' \text{ S}$. A região pertence à zona climática tropical úmida, do tipo Af, segundo classificação de Köppen (Alvares *et al.* 2013), cujo período de maior precipitação se concentra de dezembro a maio, e de menor precipitação de junho a novembro (Santos *et al.* 2016).

Foram utilizadas mudas de *Euterpe oleracea* Mart., da variedade BRS Pai D'égua, adquiridas aos 3 meses de idade, por meio de uma empresa certificada no município de Belém, PA. Inicialmente as mudas foram aclimatadas por aproximadamente 30 dias, nesse período receberam durante 3 dias, irrigação com solução nutritiva completa a 50% (Arnon e Hoagland, 1950). O transplântio das mudas para os vasos definitivos se deu aos 4 meses de idade, onde

essas apresentavam 2 pares de folhas, 56,8 cm de altura e 3,2 cm de circunferência do coleto, a partir dos valores médios estimados para dez mudas. Os vasos utilizados possuíam volume de 8 L, contendo substrato a partir de um Latossolo Amarelo de textura média.

O procedimento de calagem foi aplicado segundo a metodologia para saturação de bases a 60%, conforme Raij (1991), utilizando calcário dolomítico, com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 91%. Após a aplicação do corretivo, o solo corrigido passou por período de incubação de 21 dias antes do transplântio das mudas, consistindo na adição do corretivo nos vasos contendo solo peneirado e mantido a 80% da capacidade de campo, por meio do método de pesagem de vasos (Viegas *et al.* 2009).

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial duplo, cujos níveis se constituíam de 4 doses de B e 4 doses de K₂O, com interação, totalizando 16 tratamentos com 5 repetições, que somaram 80 unidades experimentais, essas unidades experimentais foram compostas por um vaso contendo uma planta. Uma adubação de base foi aplicada aos 18 DAT, em cada vaso, nas doses de N= 100 mg dm⁻³, P= 75 mg dm⁻³ e S= 40 mg dm⁻³ conforme Silva (2009), usando como fontes ureia estabilizada (45% de N (CH₄N₂O), cloreto de potássio (60% de K₂O) e superfosfato simples (16% de P₂O₅ e 10% de S; Ca(H₂PO₄)₂ + CaSO₄.2H₂O).

A aplicação dos tratamentos se deu aos 22 dias após o transplântio (DAT), via solo. Como fonte de nutrientes foram utilizados os fertilizantes comerciais, cloreto de potássio (KCl) (60% de K₂O) e o tetraborato penta-hidratado (Granubor) (15% de B), nas proporções 0,1 (K0), 0,2 (K1), 0,3 (K2) e 0,4 (K3) g dm⁻³ e 0 (B0), 0,001 (B1), 0,002 (B2), 0,003 (B3) g dm⁻³, respectivamente (Tabela 2). As doses dos fertilizantes foram estabelecidas com base nos resultados das análises de solo e em recomendações expressas para o cultivo do açaizeiro, conforme Brasil, Cravo e Viegas (2020), que foram convertidas de g/touceira para o volume de 8 dm⁻³ de solo por vaso. Para as fontes fosfatadas e potássicas, realizou-se a conversão dos teores elementares para suas respectivas formas comerciais (P₂O₅ e K₂O), com base nas massas moleculares. As quantidades aplicadas foram ajustadas em função dos percentuais de nutrientes presentes nos fertilizantes utilizados.

Tabela 2- Descrição dos tratamentos combinando doses de boro (B) e potássio (K₂O) em mudas de açaí (*E. oleracea*) variedade BRS Pai D'égua.

Nº DO TRATAMENTO	CÓDIGO	Combinação	
		B (mg dm ⁻³)	K (g dm ⁻³)
1	B0K0	0	0,1
2	B0K1	0	0,2
3	B0K2	0	0,3
4	B0K3	0	0,4
5	B1K0	1	0,1
6	B1K1	1	0,2
7	B1K2	1	0,3
8	B1K3	1	0,4
9	B2K0	2	0,1
10	B2K1	2	0,2
11	B2K2	2	0,3
12	B2K3	2	0,4
13	B3K0	3	0,1
14	B3K1	3	0,2
15	B3K2	3	0,3
16	B3K3	3	0,4

3.3. Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas no software *R* (*R Core Team, 2025*), considerando delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 4×4 . Inicialmente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias foram avaliados pelos testes de Shapiro–Wilk e Bartlett, respectivamente, para todas as variáveis. Inicialmente, foi ajustado um modelo de regressão linear múltiplo para avaliar os efeitos das doses isoladas de B, K e da interação $B \times K$ sobre as variáveis analisadas. A significância dos efeitos principais e da interação foi verificada por meio da análise de variância (ANOVA). Na ausência de interação significativa, os efeitos dos nutrientes foram avaliados de forma isolada, por meio do ajuste de modelos de regressão simples.

Para cada fator foram testados modelos de regressão linear e polinomial de segundo grau. Quando ambos os modelos apresentaram coeficientes significativos, a escolha do modelo mais adequado foi realizada com base no Critério de Informação de Akaike (AIC), adotando-se o modelo com menor valor de AIC. O ajuste dos modelos foi avaliado por meio da análise dos resíduos e de estatísticas de qualidade do ajuste, sendo utilizado o coeficiente de determinação (R^2) para avaliar a proporção da variação da variável resposta explicada pelo modelo.

3.4. Variáveis avaliadas

3.4.1. Trocas gasosas

Os parâmetros de trocas gasosas foram estimados nos folíolos da terceira folha fisiologicamente madura e completamente expandida, do ápice para a base de acordo com Rodrigues (2023), aos sete meses após a aplicação dos tratamentos. Os parâmetros estabelecidos foram: A taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), a condutância estomática ao vapor d'água (g_s), concentração de CO_2 intercelular e ambiente (C_i/C_a) e a transpiração (E) foram determinadas usando um analisador portátil de gases a infravermelho (LI-6400 XT; LI-COR Biosci. Inc., Nebraska, EUA). As medições foram realizadas entre 9 e 11:30 h usando como referência os estudos de Castro *et al.* (2020) e Moreno *et al.* (2022), sob concentração de CO_2 de $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de $864 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As medições ocorreram sob temperatura do ar de $33 \pm 2^\circ\text{C}$, umidade relativa do ar de $76 \pm 2\%$, radiação incidente de $998 \pm 1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e déficit de pressão de vapor do ar de $1,2 \pm 0,2$ kPa.

3.4.2. Estimativas de Clorofila Total, Clorofila *a* e *b*

Os teores de clorofila Total, clorofila-*a* e clorofila-*b* foram estimadas por análise espectral foliar utilizando o espectrômetro portátil SpectraVue™ CI-710 (CID Bio-Science, Camas, WA, USA), previamente calibrado com padrão branco. As leituras foram realizadas na face adaxial da terceira folha fisiologicamente madura, completamente expandida (Souza, 2021; Rodrigues, 2023), com duas medições por folha, em ambiente controlado. Posteriormente médias, na faixa espectral de 400–950 nm. Os valores foram obtidos automaticamente pelo software do equipamento.

3.4.3. Parâmetros de crescimento morfológico

Avaliações biométricas foram realizadas mensalmente abrangendo altura da planta (AP) e circunferência do coleto (CC), mensuradas com fita métrica (cm), além da contagem do número de folhas completamente desenvolvidas (NF) e do número de folíolos por planta (NFP).

3.4.4. Medidas de Biomassa e raízes

As avaliações de biomassa das mudas por tratamento ocorreram aos 203 DAT. O material vegetal foi separado conforme os diferentes órgãos da planta, acondicionado em sacos de papel e submetido à secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 70 °C, até atingir peso constante, de acordo com Viegas *et al.* (2009). As amostras foram retiradas da estufa e pesadas em balança de precisão, onde determinou-se a massa seca das folhas (MSF), massa seca das raízes (MSR), massa seca de estipe (MSE), expressas em gramas (g). Posteriormente, as amostras foram trituradas em moinho tipo Willey para trituração e análise da composição química, segundo metodologia descrita por Silva (2009).

Também foram mensurados volume radicular (VR) em cm³, determinado pelo princípio de Arquimedes (empuxo). De modo que, após o destacamento das partes da planta, as amostras de raízes foram previamente submergidas e armazenadas em recipientes contendo água por 24 horas, para reidratação. Após a hidratação, cada amostra foi imersa em becker com água, por meio de um suporte. De acordo com o princípio de Arquimedes, a medida de massa de água deslocada é igual ao volume da amostra (Silva, 2018; Silva, 2019). Posteriormente, as amostras avaliadas foram devidamente armazenadas e identificadas e por fim, secas em estufa a 70°C, até peso constante. A área foliar total (AFT) em cm² foi obtida por meio de medidor de área foliar de bancada (LI-3100C Leaf Area Meter).

Para estimar se o investimento foi maior para raízes ou parte aérea foi calculada a razão raiz: parte aérea (R/PA), pela fórmula:

$$R/PA = \frac{M_{raiz}}{M_{parte\ aérea}}$$

onde:

- M_{raiz} = massa seca das raízes (g)
- $M_{parte\ aérea}$ = massa seca da parte aérea (g), que inclui caule + folhas

3.4.5. Sintomas de deficiência e toxidez de B e K em mudas de açazeiro

O acompanhamento dos sintomas visuais de deficiência e toxidez de B e K em mudas de açazeiro foi realizado ao longo do período experimental, após a aplicação das diferentes doses de tetraborato penta-hidratado e cloreto de potássio (KCl). As avaliações foram conduzidas por meio de observações visuais, com foco na parte aérea das mudas, considerando alterações associadas ao desequilíbrio nutricional (cor e forma). Os sintomas observados foram registrados em planilhas eletrônicas, sendo anotadas para cada unidade experimental o tratamento aplicado, data da observação, órgão afetado, posição da folha na planta (folhas jovens ou maduras) e descrição do sintoma visual (clorose, necrose marginal, deformações, encarquilhamento, morte de meristemas, entre outros).

Esse procedimento foi adotado a fim de comparação entre o tipo de sintoma e o nutriente envolvido. Ao mesmo tempo em que, os sintomas foram documentados por meio de registro fotográfico, utilizando-se câmera digital modelo Nikon D3200. As imagens foram obtidas após o sintoma ser detectado em maioria das plantas de mesmo tratamento, terem ocorrência de forma simétrica em folhas próximas de mesma planta e mediante diferença de coloração (gradiente) entre folhas velhas e novas na mesma planta, segundo Faquin (2002).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância (Tabela 3) demonstrou não haver interações significativas entre as doses de B e K para todas as variáveis avaliadas, indicando independência nos efeitos desses nutrientes. No geral, o B exerceu efeito significativo sobre variáveis relacionadas ao

crescimento radicular e sustentação, como circunferência do coleto (*CC*), massa seca de raiz (*MSR*) e volume de raiz (*VR*), além do CO₂ interno e ambiente (*Ci/Ca*). Por outro lado, o K influenciou significativamente parâmetros fisiológicos associados às trocas gasosas, incluindo assimilação líquida de CO₂ (*A*), condutância estomática (*gs*) e transpiração (*E*).

Tabela 3- Resumo da análise de variância (ANOVA) das variáveis de crescimento e trocas gasosas de mudas de açaizeiro cultivadas em Latossolo Amarelo submetidas a diferentes doses de B e K. Valores correspondem aos níveis de significância (p-valor) para os efeitos de Bloco, B, K e interação B×K. Nas variáveis Assimilação líquida de CO₂ — (*A*), Condutância estomática — (*gs*), CO₂ interno e ambiente — (*Ci/Ca*), Transpiração — (*E*), Clorofila Total — (*CPHLT*), Clorofila-*a* — (*CPHLA*), Clorofila-*b* — (*CPHLB*), Altura de plantas — (*AP*), Circunferência do coleto — (*CC*), Numero de folhas — (*NF*), Numero de folíolos por planta — (*NFP*), Massa seca foliar — (*MSF*), Massa seca raiz — (*MSR*), Massa seca do estipe — (*MSE*), Volume de Raiz — (*VR*), Área Foliar Total — (*AFT*), Razão Raiz: Parte Aérea — (*RPPA*).

Variáveis	B		K		B*K		CV %
<i>A</i>	0.213960	NS	0.000629	*	0.150145	NS	20.89
<i>gs</i>	0.098724	NS	0.000753	*	0.114389	NS	30.19
<i>Ci/Ca</i>	0.00563	*	0.32691	NS	0.58887	NS	13.76
<i>E</i>	0.129133	NS	0.003254	*	0.186705	NS	28.05
<i>CPHLT</i>	0.50099	NS	0.37154	NS	0.47443	NS	10.13
<i>CPHLA</i>	0.46431	NS	0.42116	NS	0.33533	NS	10.16
<i>CPHLB</i>	0.52076	NS	0.35216	NS	0.55942	NS	10.32
<i>AP</i>	0.35036	NS	0.22194	NS	0.07568	NS	10.97
<i>CC</i>	0.029003	*	0.311118	NS	0.181524	NS	9.86
<i>NF</i>	0.15273	NS	0.65165	NS	0.87336	NS	11.69
<i>NFP</i>	0.85098	NS	0.63740	NS	0.50239	NS	31.92
<i>AFT</i>	0.06457	NS	0.66829	NS	0.38501	NS	28.09
<i>MSF</i>	0.23515	NS	0.57773	NS	0.48016	NS	26.5
<i>MSR</i>	0.04533	*	0.97107	NS	0.26257	NS	32.17
<i>MSE</i>	0.18401	NS	0.36369	NS	0.12475	NS	23.49
<i>VR</i>	0.02411	*	0.74646	NS	0.27607	NS	30.5
<i>RRPA</i>	0.07913	NS	0.57474	NS	0.19158	NS	23.29

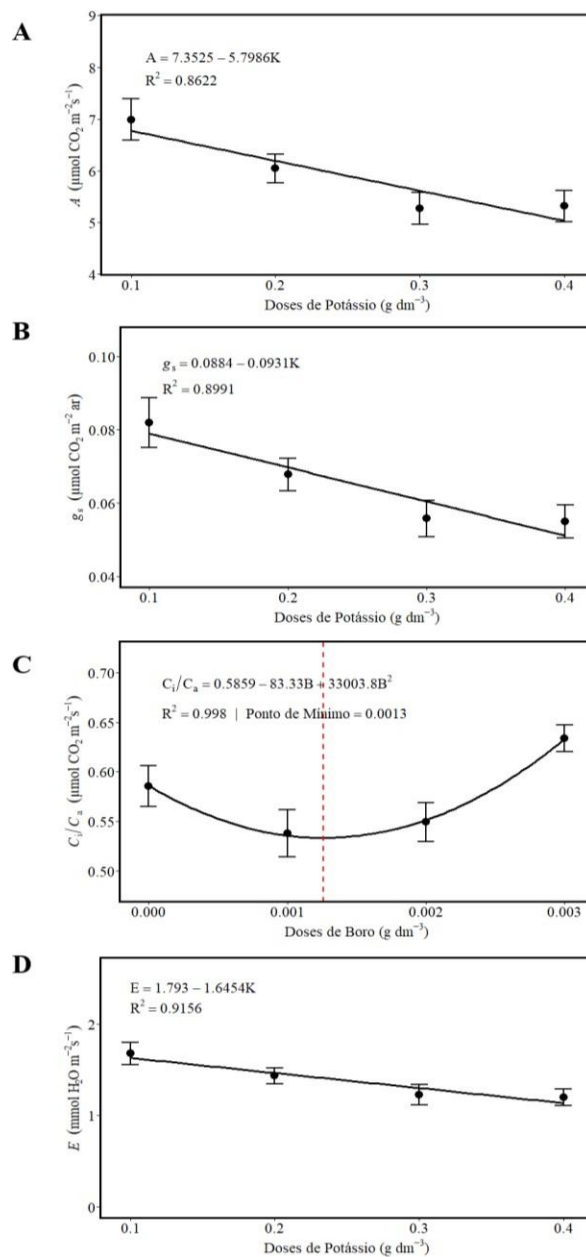
Notas: CV% = coeficiente de variação. NS não significativo; * significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

4.2. Trocas gasosas

O fator K afetou significativamente as variáveis de trocas gasosas (Figura 1). Para as variáveis assimilação líquida de CO₂ (*A*), condutância estomática (*gs*) e transpiração (*E*), foram ajustados modelos lineares decrescentes em função do incremento das doses de K₂O. Em

contrapartida, a relação entre a concentração interna e atmosférica de CO₂ (C_i/C_a) apresentou resposta quadrática às doses de B, com ponto de mínimo estimado em 0,0013 g dm⁻³. Ademais, não foram observados efeitos significativos da interação B × K para nenhuma das variáveis de trocas gasosas avaliadas, indicando ausência de efeito conjunto dos fatores sobre essas respostas.

Figura 1- Parâmetros de trocas gasosas em mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) submetidas a doses de K e B: assimilação líquida de CO₂ — A (A), condutância estomática — g_s (B) e taxa de transpiração — E (D) em resposta a doses de K e razão entre carbono interno e ambiente — C_i/C_a (C) em resposta a doses de B. A linha vermelha tracejada (---) indica o ponto de mínimo estimado pelo modelo matemático dentro do intervalo experimental.



A redução linear da A , da g_s e E com o incremento das doses de K_2O demonstra uma resposta integrada das trocas gasosas ao tratamento. A redução simultânea de g_s e E é compatível com menor abertura estomática e menor perda de água, enquanto o decréscimo de A indica que a restrição à difusão de CO_2 pode ter contribuído para a limitação fotossintética (Farquhar; Sharkey, 1982; Lawson; Blatt, 2014). Contudo, a redução de A não pode ser atribuída exclusivamente ao componente estomático, uma vez que desequilíbrios metabólicos e processos internos difusivos também podem ocorrer, especialmente em respostas a condições de estresse osmótico ou iônico (Munns; Tester, 2008).

Embora o K desempenhe funções essenciais na osmorregulação, no movimento estomático e na manutenção da fotossíntese, sua resposta depende da dose, da condição nutricional e da fonte empregada (Marschner, 2012; Wang *et al.* 2013). Considerando que a fonte utilizada nesse estudo foi o KCl, o aumento das doses de K_2O também implicou maior adição de Cl^- ao substrato. Em concentrações elevadas, esse íon pode contribuir para efeitos osmóticos, toxicidade específica ou desequilíbrio iônico, com impactos sobre a abertura estomática e a assimilação de carbono (White; Broadley, 2001; Geilfus, 2018). Contudo, como não foram avaliados a condutividade elétrica, o teor de Cl^- ou outros indicadores do estado salino do substrato e das plantas, um possível efeito salino é mencionado apenas como hipótese explicativa.

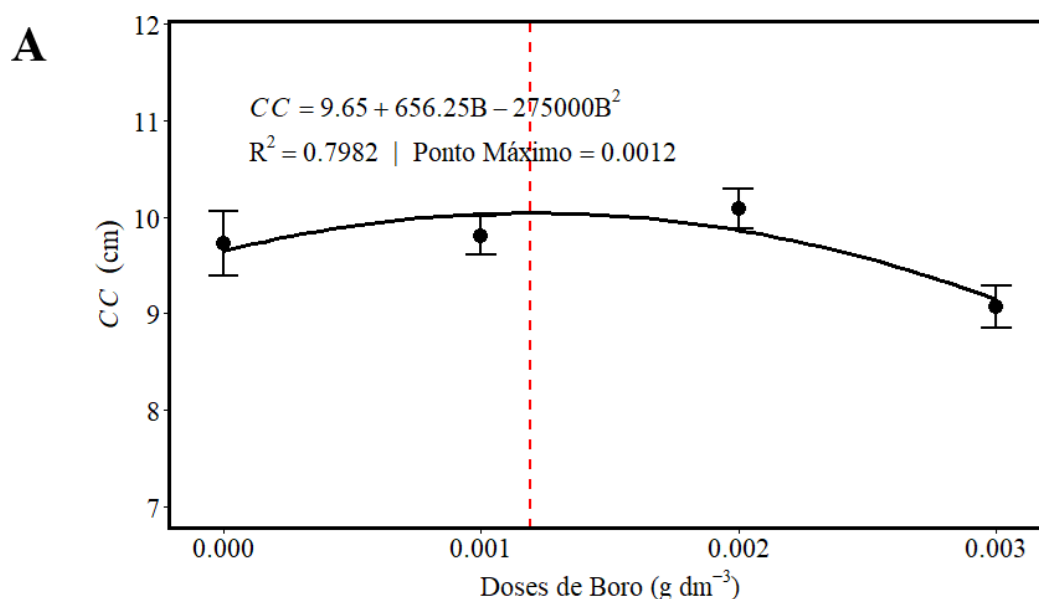
A resposta quadrática de C_i/C_a às doses de B, com ponto de mínimo estimado em $0,0013 \text{ g dm}^{-3}$, demonstra uma alteração não linear da relação entre as concentrações intercelular e atmosférica de CO_2 . Esse comportamento é compatível com a estreita faixa entre deficiência, suficiência e toxicidade relatada para o B e observada em diversas espécies vegetais (Brown *et al.* 2002; Camacho-Cristóbal; Rexach; González-Fontes, 2008). Além disso, a deficiência de B perturba a estrutura dos cloroplastos e o funcionamento dos tilacóides, o que restringe a assimilação de CO_2 e leva a reduções substanciais na fotossíntese (Pandey e Pandey, 2008).

A redução de C_i/C_a nas menores doses de B pode indicar maior consumo relativo do CO_2 presente nos espaços intercelulares ou maior restrição à sua entrada, enquanto a elevação nas doses superiores pode estar associada à menor capacidade de fixação do CO_2 . Entretanto, C_i/C_a isoladamente não permite separar limitações estomáticas de limitações bioquímicas, devendo ser interpretada em conjunto com A , g_s , E e dos parâmetros fotoquímicos (Farquhar; Sharkey, 1982; Flexas *et al.* 2004).

4.3. Parâmetros de crescimento morfológico

A circunferência do coleto (CC) apresentou resposta quadrática significativa às doses de B, com coeficiente de determinação de $R^2 = 0,7982$ e ponto de máximo estimado na dose de $0,0012 \text{ g dm}^{-3}$ (Figura 2). Observou-se que tanto a ausência quanto o fornecimento em doses mais elevadas do micronutriente estiveram associados a menores valores de CC, enquanto as doses intermediárias promoveram maior desenvolvimento. Esse comportamento reforça uma faixa de resposta morfológica relativamente estreita do açaizeiro à disponibilidade de B, na qual tanto a baixa disponibilidade quanto o aumento das doses acima ponto de máximo, podem restringir o crescimento do coleto. Padrão semelhante é amplamente relatado em diferentes espécies vegetais submetidas a variações no fornecimento de B (Brown *et al.* 2002; Huang *et al.* 2014).

Figura 2- Circunferência do coleto — (CC) de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) em resposta a doses de B. A linha de regressão representa o ajuste do modelo quadrático aos dados observados, com ponto de máximo estimado em $0,0012 \text{ g dm}^{-3}$ de B. A linha vermelha tracejada (---) indica o ponto de máximo estimado pelo modelo matemático dentro do intervalo experimental.



O maior desenvolvimento do CC, estimado no ponto $0,0012 \text{ g dm}^{-3}$, sugere que essa dose proporcionou condições favoráveis ao desenvolvimento da variável nas condições avaliadas. Essa resposta se relaciona à importância do B em processos associados ao crescimento e à formação dos tecidos vegetais, devido seu papel importante no fortalecimento da parede celular por meio da complexação com derivados pécicos e galacturônicos de configuração cis-diol via ligações éster de borato, contribuindo para a estabilidade e integridade

dos tecidos, além de favorecer a manutenção integridade das membranas e do crescimento meristemático. Por outro lado, sob restrição de B, esses processos podem ser comprometidos, afetando a divisão e expansão celular e, conseqüentemente, o desenvolvimento dos meristemas apicais da raiz e do caule (Brown *et al.* 2002; Malavolta *et al.* 1997; Gupta, 2007; Manfredini, 2008; Chen *et al.* 2024).

Resultados semelhantes foram reportados por Viegas *et al.* (2008), que observaram reduções de 24% na CC de mudas de açaizeiro cultivadas sob omissão de B. Do mesmo modo, Veloso, Silva e Sales (2015) constataram a importância do elemento para o desenvolvimento inicial do estipe, relatando declínios graduais no diâmetro do coleto quando em doses elevadas ou quando aplicações localizadas superaram o limiar de suficiência para a cultura. Nessa ótica, de acordo com Brown *et al.* (1992), as plantas monocotiledôneas são conhecidamente menos exigentes em B e mais sensíveis à sua toxicidade que as dicotiledôneas. Essa sensibilidade é determinada pelo teor de pectina na parede celular, uma vez que as monocotiledôneas apresentam menores quantidades desse composto em comparação às dicotiledôneas (Hu *et al.* 1996).

Por sua vez, o declínio na curva de CC observado a partir da dose de $0,0012 \text{ g dm}^{-3}$ indica possíveis efeitos iniciais de fitotoxidez por B, sendo necessário indicadores adicionais como ferramentas para sua confirmação. Ainda assim, maiores doses surtiram efeito inverso ao favorecimento no crescimento do coleto, quando em comparação as doses intermediárias. Nesse contexto, o excesso do micronutriente pode desencadear uma série de estresses oxidativos, alterando inúmeros processos metabólicos essenciais e prejudicando a incorporação de fotoassimilados nos drenos basais (Camacho-Cristóbal *et al.* 2008; Veloso; Silva; Sales, 2015).

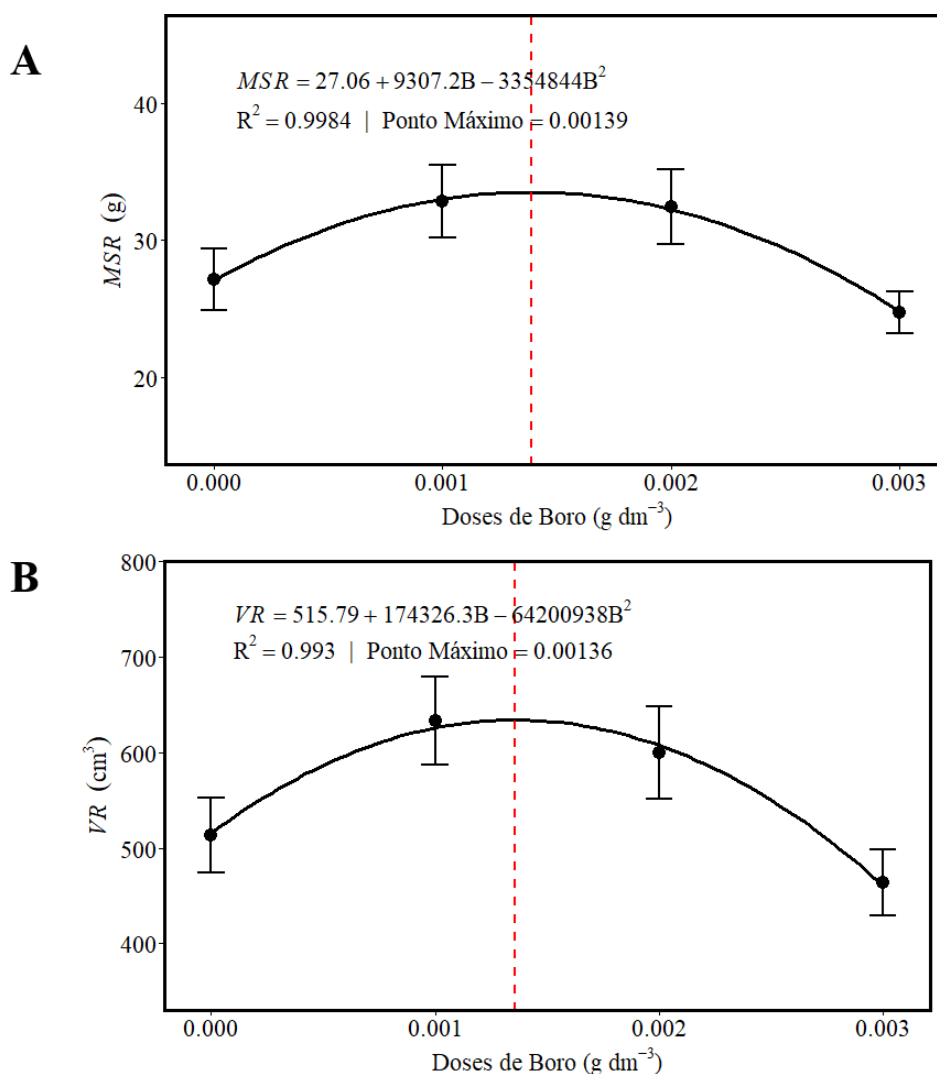
Diante do exposto, esses resultados corroboram a necessidade de um manejo criterioso quanto ao fornecimento do B, confirmando seu estreito limiar entre deficiência e toxidez, assim como a sensibilidade das mudas avaliadas às variações na disponibilidade do micronutriente, especialmente nos primeiros anos. Tais cuidados se tornam essenciais para garantir às mudas estabilidade e diâmetro de coleto ideais no momento do plantio definitivo, resultando em seu desempenho em campo (Costa *et al.* 2014; Lindolfo *et al.* 2020).

4.4. Medidas de biomassa e raízes

Embora obtidas por métodos distintos, a MSR (A) e o VR (B) apresentam visível similaridade nos resultados (Figura 3), e seus valores podem ser considerados complementares na compreensão do desenvolvimento radicular das mudas. Logo, as equações de regressão

indicam que a cultura apresenta sensibilidade a flutuações nos níveis de B, visto que tanto menores doses quanto as excessivas produziram comportamento letárgico nas mudas quando abaixo e acima de $0,0013 \text{ g dm}^{-3}$ de B. Ambas as variáveis apresentaram sensibilidade às doses, com respostas que se ajustaram ao modelo quadrático para ambas as variáveis (MSR , $R^2 = 0,998$ e VR , $R^2 = 0,993$), indicando dependência no crescimento do sistema radicular a disponibilidade do micronutriente.

Figura 3- Parâmetros de biomassa e morfologia radicular em mudas de açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) em resposta a doses de B: massa seca de raízes — MSR (A) e volume radicular — VR (B). As linhas de regressão representam o ajuste dos modelos quadráticos aos dados observados, a linha vermelha tracejada (---) indica o ponto de máximo estimado pelo modelo matemático dentro do intervalo experimental.



Os valores máximos de crescimento para essas variáveis convergiram na faixa de $0,0013 \text{ g dm}^{-3}$ de B, apontando a dose como ótima técnica para o máximo ganho em biomassa e volume radicular, sofrendo redução gradual com o aumento das concentrações após essa faixa. Com

relação aos níveis de deficiência, a expressiva redução do sistema radicular na ausência de B (dose de 0,000 g dm⁻³ de B) evidencia o papel crucial do B nos meristemas apicais das raízes (Hu e Brown, 1994). Em razão de sua mobilidade restrita em maioria das espécies, o elemento é absorvido pelas raízes e utilizado imediatamente para o crescimento local e diferenciação das pontas radiculares (Shimotohno *et al.* 2015).

Sob deficiência de B, ocorre redução drástica do número de células meristemáticas ativas e paralisação do alongamento da zona celular radicular (Zhang *et al.* 2021). Do ponto de vista mecanístico, essa restrição é mediada pela supressão da via de sinalização dos brassinosteróides (BR) e pela alteração na distribuição polar de auxina (AIA), além da superexpressão de etileno (ET), fitormônio que atua diretamente na inibição do crescimento da raiz principal e das raízes laterais (González-Fontes *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2021). Visualmente, os sintomas resultam em raízes curtas, inchadas e com desorganização estrutural (Dell; Huang, 1997; Wu *et al.* 2017).

Por outro lado, incrementos acima da faixa de 0,00136 a 0,00139 g dm⁻³ de B ocasionaram acentuado decréscimo nessas variáveis, respectivamente, confirmando possíveis efeitos fitotóxicos da bioacumulação de B. O excesso do micronutriente pode igualmente prejudicar o crescimento radicular, afetando a permeabilidade da membrana plasmática, induzindo a peroxidação lipídica e desorganização estrutura do tecido radicular (Cakmak *et al.* 1995; Camacho-Cristóbal *et al.* 2011; Taiz; Zeiger, 2017). Do mesmo modo, a abundância de B na solução do solo pode sinalizar negativamente para a expansão radicular, uma vez que a planta reduzirá sua necessidade de aumentar a superfície de contato em busca do elemento (Velo, Silva; Sales, 2015).

A resposta de *MSR* e *VR* a doses superiores ao ponto de máximo é compatível com o comportamento típico de culturas sensíveis à disponibilidade excessiva de B, para as quais o limiar entre a deficiência e níveis potencialmente excessivos pode ser relativamente estreita. Estudos com diferentes espécies demonstram redução do crescimento radicular em condições de deficiência e de elevada disponibilidade de B (Dell; Huang, 1997; Camacho-Cristóbal; Rexach; González-Fontes, 2008). Em açaizeiro, Viegas *et al.* (2008) observaram alterações no crescimento de mudas em resposta à omissão de B, demonstrando que a disponibilidade desse micronutriente é relevante para o desenvolvimento inicial da espécie.

O padrão observado neste experimento também é compatível com estudos que demonstram alterações no crescimento das raízes sob deficiência de B. Wu *et al.* (2017), em testes com laranjeira trifoliada, observaram alterações em seu desenvolvimento radicular sob

baixa disponibilidade do elemento, enquanto Zhang *et al.* (2021) relacionaram a deficiência de B à redução do crescimento das raízes de *Arabidopsis thaliana* e a alterações em processos relacionados à atividade meristemática. Apesar de não se tratar da mesma espécie, esses estudos, no entanto, descrevem padrões e mecanismos fundamentais que servem de base fisiológica e auxiliam na interpretação dos resultados obtidos nas mudas de *E. oleracea*.

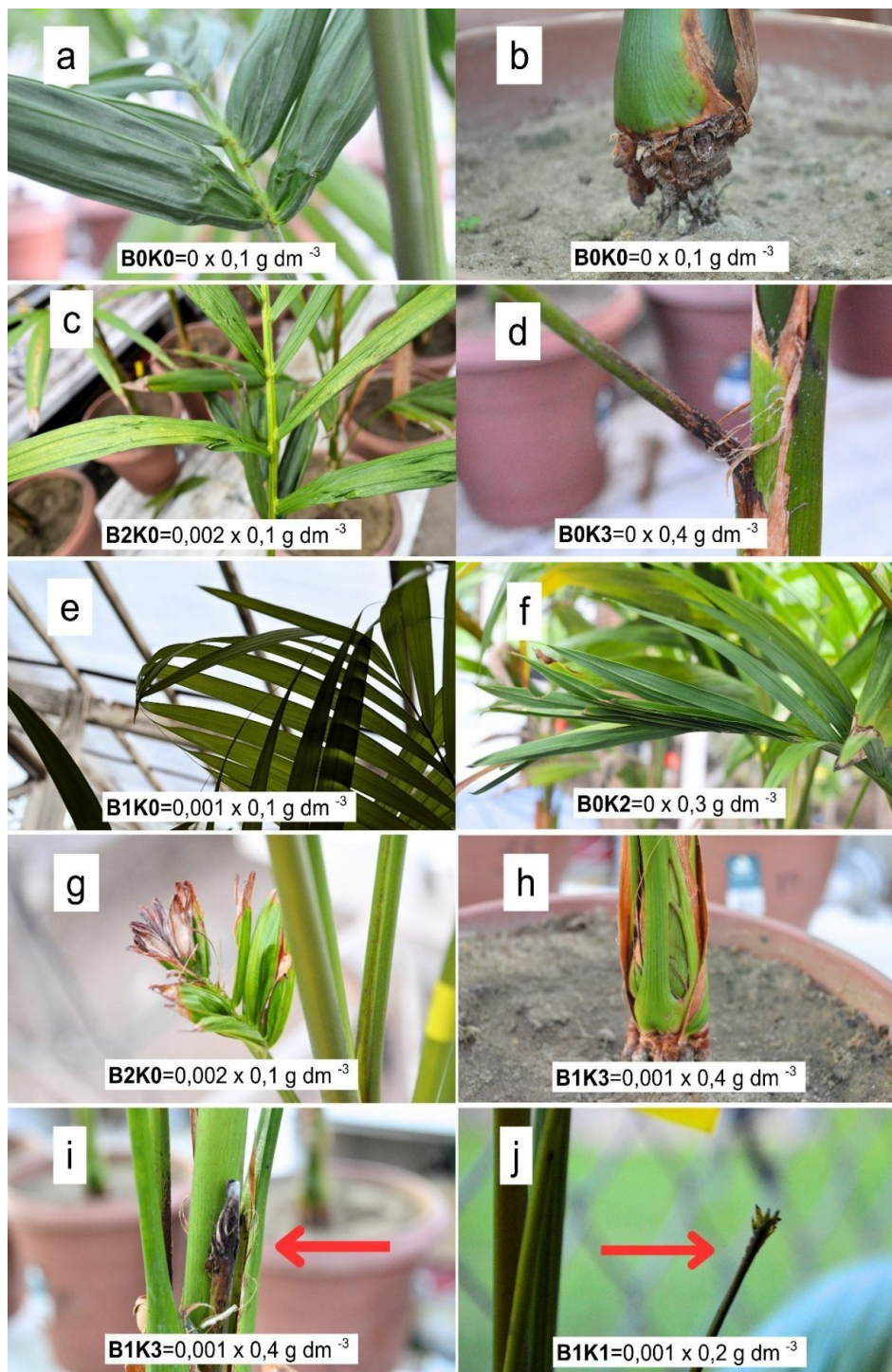
4.5. Sintomas de deficiência e toxidez de B e K em mudas de açaizeiro

4.5.1. Sintomas de deficiência de B

Os sintomas de deficiência de B tornaram-se mais evidentes a partir de 53 dias após o início dos tratamentos (Figura 4). Nos tratamentos, especialmente sem aplicação de B (B0K0 ao B0K3), as mudas apresentaram folhas jovens mal desenvolvidas, deformadas ou “encarquilhadas”, com pecíolo de aparência frágil, cortiçoso, grosso e quebradiço, folíolos fundidos desde a base ou em forma de “espinha de peixe”, com as pontas ainda grudadas. Com o agravamento dos sintomas, observou-se escurecimento e morte dos tecidos, principalmente nas extremidades foliares, além de má formação na base do estipe, caracterizado por rachaduras. Nas raízes, verificaram-se crescimento reduzido, pontas engrossadas, escurecidas e quebradiças, que posteriormente, evoluíram para necrose e morte gradual do ápice radicular em direção à base.

Os sintomas observados nas mudas de açaizeiro apresentam semelhanças com aqueles descritos por Pinho (2008) em coqueiros e por Viégas *et al.* (2008) em açaizeiros, reforçando a ocorrência de padrões característicos de deficiência de B em espécies da família Arecaceae. Entretanto, diferente do relatado por Pinho (2008), em que os sintomas iniciais se manifestaram como pontuações translúcidas e áreas despigmentadas nas folhas, as mudas de *E. oleracea* apresentaram, desde os estágios iniciais, alterações estruturais mais pronunciadas em tecidos jovens, especialmente folhas e raízes. Entre os principais sintomas destacaram-se a deformação foliar, fusão de folíolos, aspecto de “espinha de peixe”, engrossamento das extremidades radiculares e morte progressiva dos tecidos meristemáticos.

Figura 4- Sintomas visuais de deficiência de B em mudas de açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivadas em Latossolo Amarelo de textura média e submetidas a diferentes combinações de doses de B e K (g dm^{-3}). Alterações morfológicas típicas da deficiência de B em tecidos jovens, incluindo má formação e enrugamento foliar (a, c), aspecto de “espinha de peixe” (e), folíolos fundidos (f), crescimento reduzido e estreitamento das folhas (g, j), fragilidade e quebra do pecíolo foliar (d), rachaduras na base do estipe (h), morte do meristema apical com comprometimento da emissão foliar (i) e escurecimento seguido de necrose radicular (b).



Segundo Malavolta (2006), o B desempenha funções essenciais na integridade da parede celular, no transporte de assimilados e na regulação de processos metabólicos relacionados ao crescimento vegetal. Dessa forma, sua deficiência desencadeia uma série de alterações fisiológicas e estruturais, frequentemente descritas como “efeito cascata”, decorrentes da interrupção do crescimento dos tecidos jovens. Como consequência, ocorre comprometimento da divisão e expansão celular, resultando na morte de meristemas, deformações foliares e redução do crescimento radicular observados nas mudas de açaizeiro.

Essa resposta tornou-se particularmente evidente em tecidos jovens, uma vez que por ser encontrado em maior abundância na parede celular vegetal, esses órgãos apresentam elevada demanda por B em virtude de seu papel na divisão e no alongamento celular (Huang *et al.* 2014). Dessa forma, a privação de B comprometeu precocemente a atividade meristemática, reduzindo o crescimento radicular e favorecendo a formação de estruturas deformadas, conforme descrito por Gupta, Hildegard e Masahiro (2013), e demonstradas ao longo das observações.

A elevada sensibilidade do açaizeiro à deficiência de B já havia sido relatada por Viégas *et al.* (2008), Viégas *et al.* (2009) e Veloso, Silva e Sales (2015). Esses autores enfatizaram que a omissão do nutriente comprometeu significativamente o crescimento inicial da cultura, em razão de sua participação na formação e sustentação das paredes celulares, na divisão celular e na regulação hormonal. A sensibilidade à deficiência de B observada no presente estudo corrobora os resultados obtidos por Viegas *et al.* (2004) em camucamuzeiro. Segundo esses autores, a carência do micronutriente também afeta significativamente outras espécies de importância econômica para a região Norte, como o coqueiro e a palma de óleo.

Além dos efeitos sobre o crescimento, plantas deficientes de B podem sofrer comprometimento indireto da atividade fotossintética. Embora não participe diretamente das reações fotossintéticas, sua carência reduz a expansão foliar, altera a estrutura dos cloroplastos e prejudica o transporte de fotoassimilados, resultando em menor assimilação de CO₂ e redução do desenvolvimento vegetal (Cakmak; Römheld, 1997; Wang *et al.* 2007; Wimmer; Eichert, 2013). Entre outros inúmeros efeitos subsequentes que contribuem para agravar o estado fisiológico das mudas em condições de deficiência de B (Lilay *et al.* 2024).

Ademais, considerando a baixa mobilidade do B na maioria das espécies vegetais, sua redistribuição para tecidos em crescimento é limitada em espécies com reduzida capacidade de remobilização, indicando não só a sensibilidade dessa espécie a carência de B, mas também justificando a manifestação dos sintomas principalmente em folhas jovens, raízes e regiões

meristemáticas das mudas, conforme constatado neste estudo (Faquin, 2002; Malavolta, 2006; Abou seeda *et al.* 2021).

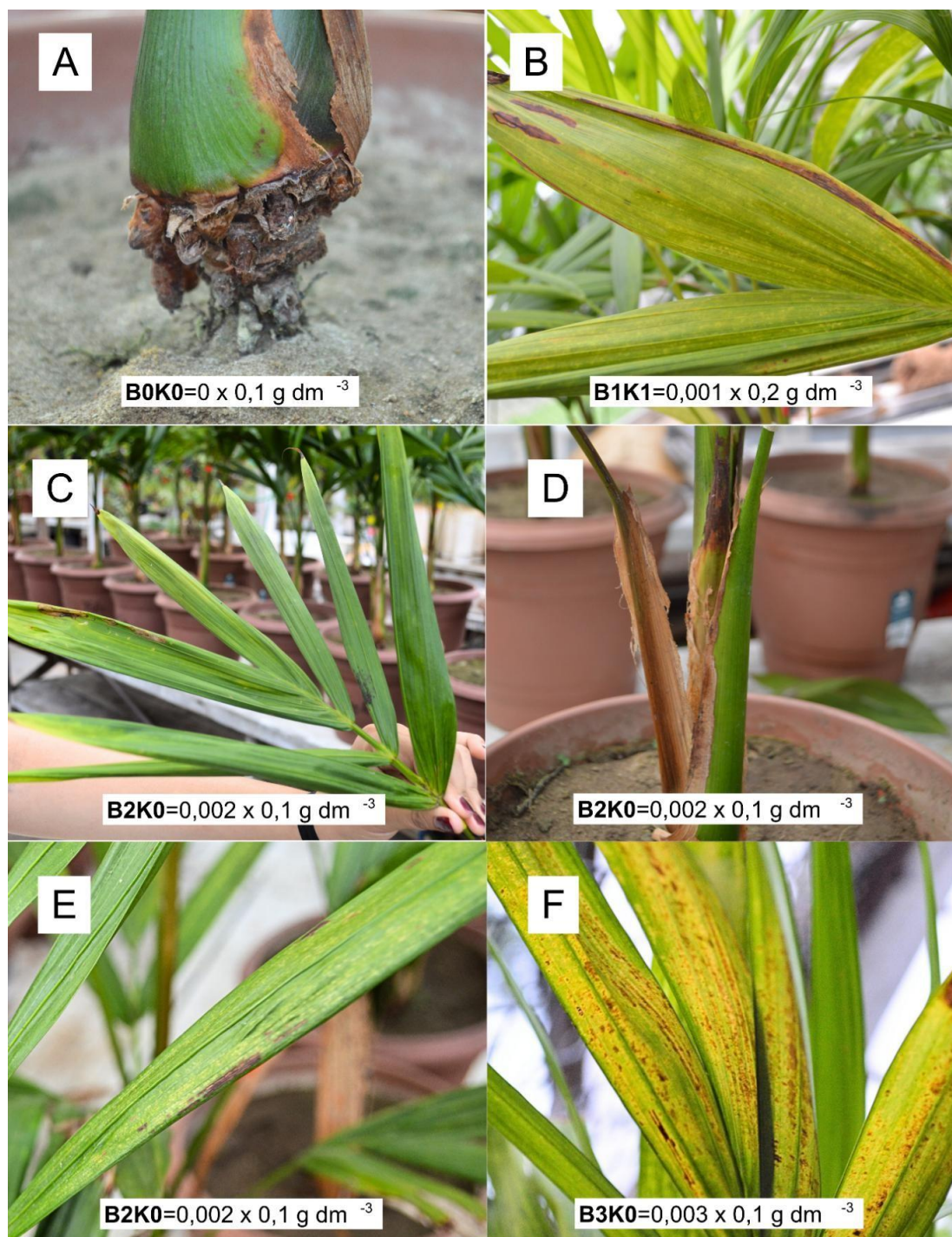
4.5.2. Sintomas de deficiência de K

Os sintomas da deficiência de K tornaram-se mais evidentes aos 74 dias após o início dos tratamentos (Figura 5), caracterizando-se inicialmente por clorose marginal em folhas mais velhas, que evoluiu para necrose nas bordas, com progressão da ponta em direção à base do limbo foliar. Em estágios mais avançados, observou-se despigmentação das folhas, encurvamento e ressecamento dos tecidos, além de desfolha prematura e formação de estipes mais estreitos e frágeis. A deficiência de K também comprometeu o desenvolvimento radicular e, quando associada à deficiência de B, intensificou os danos ao sistema radicular, tornando as mudas mais suscetíveis ao tombamento, apesar de não constatado efeito significativo para interação entre ambos os elementos.

Os sintomas observados neste estudo são compatíveis com aqueles descritos para a deficiência de K em diversas espécies vegetais. Ueno *et al.* (2018) relatam que a necrose nas extremidades foliares pode estar associada à ativação de genes relacionados ao metabolismo do jasmonato, culminando na senescência dos tecidos. O bronzeamento foliar, por sua vez, tem sido relacionado ao acúmulo de poliaminas, como a putrescina (Gupta *et al.* 2013), enquanto as cloroses e necroses marginais estão associadas ao aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Pottosin; Shabala, 2016).

Além disso, a redução do crescimento radicular pode decorrer da diminuição da condutância estomática e da atividade fotossintética, resultando no acúmulo de sacarose nas folhas mais velhas e em menor disponibilidade desse carboidrato para raízes e demais órgãos dreno. Essa redistribuição inadequada dos fotoassimilados limita especialmente a emissão e o crescimento das raízes laterais, comprometendo o desenvolvimento do sistema radicular poucas horas após a suspensão do seu fornecimento (Cakmak, 2005; De Bang *et al.* 2021).

Figura 5- Sintomas visuais de deficiência de K em mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivadas em Latossolo Amarelo de textura média e submetidas a diferentes combinações de doses de B e K (g dm^{-3}). Observam-se necrose e ressecamento na base do estipe, associados ao comprometimento do sistema radicular (A); clorose e despigmentação foliar acompanhadas de maior fragilidade e quebra das folhas (B, F); aspecto seco, redução do crescimento e estreitamento do limbo foliar (C); enfraquecimento e ressecamento do pecíolo, com desfolha prematura (D); clorose marginal evoluindo para necrose nas extremidades do limbo foliar (B, E); e pontuações necróticas distribuídas ao longo das folhas, associadas à intensa descoloração foliar (F).



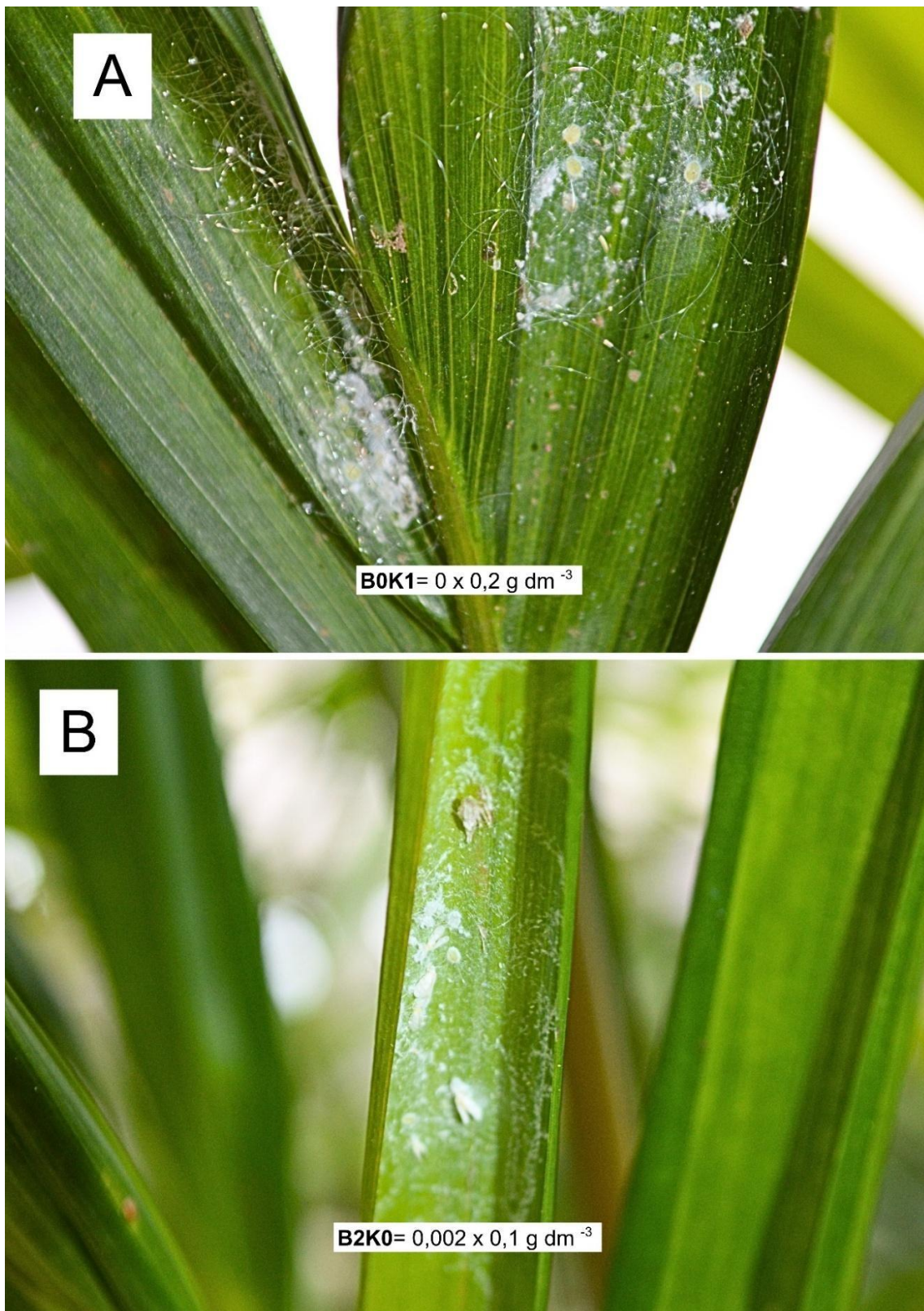
As alterações verificadas nas mudas de açaizeiro também foram igualmente descritas em outras palmeiras, como pupunheira e palma de óleo (Fernandes *et al.* 2013; Alves *et al.* 2017; Matos *et al.* 2020). A elevada mobilidade do K no floema explica o aparecimento inicial dos sintomas em folhas mais velhas, uma vez que o nutriente é remobilizado desses tecidos para órgãos mais jovens em situações de deficiência (De Bang *et al.* 2021; Malavolta, 2006). Nesse contexto, a redução do diâmetro dos estipes e a maior suscetibilidade ao tombamento observadas neste estudo podem estar relacionadas ao papel do K na formação e resistência dos tecidos vegetais e a formação de raízes.

De acordo com Broschat (2009), a deficiência de K constitui uma das principais causas de mortalidade em palmeiras ornamentais, refletindo a elevada exigência desse grupo pelo macronutriente. O autor destaca que a utilização de fertilizantes com elevada relação N:K, quando empregada para estimular o crescimento vegetal, pode intensificar a deficiência de K, acelerando o declínio fisiológico das plantas. Esse efeito contrasta com os benefícios proporcionados pelo adequado suprimento do nutriente, que favorece o desenvolvimento do esclerênquima e do sistema radicular, aumentando a sustentação da planta e sua fixação ao solo (Malavolta, 2006). Assim, a deficiência de K compromete a resistência mecânica dos tecidos, favorece o acamamento e reduz o crescimento e a produtividade, especialmente em espécies monocotiledôneas.

Além dos sintomas observados, verificou-se a presença de insetos fitófagos da espécie *Alleorodicus cocois* (Mosca branca), com registro de colônias de indivíduos na face abaxial das folhas (Figura 6), em especial nos tratamentos que associaram a ausência de B às menores doses de K. Também foi constatada a ocorrência de secreções cerosas e do fungo fumagina, presente na maioria das plantas infestadas pelo inseto, indicando uma relação entre o hábito alimentar da mosca-branca e o desenvolvimento desse fungo.

Situações semelhantes têm sido registradas em diferentes espécies de palmeiras durante os primeiros anos de desenvolvimento, com a formação de colônias de adultos e ninfas na face abaxial das folhas. Esses insetos alimentam-se da seiva vegetal e excretam substâncias açucaradas que favorecem o desenvolvimento de fumagina e, frequentemente, a presença de formigas associadas. Como consequência, podem ocorrer redução da área fotossinteticamente ativa, cloroses, atraso no crescimento e, em casos mais severos, morte das plantas (Raizer, 2016; Lemos, 2021).

Figura 6- Registros da ocorrência de mosca-branca (*Alleurodicus cocois*) em mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivadas em Latossolo Amarelo de textura média e submetidas a diferentes combinações de doses de B e K (g dm^{-3}). Observam-se colônias de adultos e ninfas na face abaxial das folhas, associadas à presença de secreções cerosas sobre a superfície foliar (A, B). As imagens correspondem aos tratamentos B0K1 (A) e B2K0 (B).



A incidência de insetos-praga é considerada um dos principais entraves à produção de mudas de açaizeiro, especialmente entre as fases de sementeira e implantação no campo, comprometendo o vigor e a qualidade das plantas (Raizer, 2016; Cesarin *et al.* 2020). Além disso, deficiências nutricionais podem aumentar a vulnerabilidade das plantas ao ataque de organismos fitopatogênicos e fitófagos. Nesse contexto, o K é reconhecido por sua contribuição para a sanidade vegetal, por suas funções no metabolismo auxiliando no aumento da espessura da parede celular, regulação estomática, ativação enzimática, o controle do pH celular, além de auxiliar na recuperação de tecidos lesionados (Anda, 2001; Pinheiro *et al.* 2011). Segundo Raij (1991), a carência de K reduz a turgescência dos tecidos, tornando as plantas mais suscetíveis ao estresse hídrico e ao ataque de patógenos.

De forma semelhante, o B desempenha papel importante na integridade da parede celular e nos mecanismos de defesa vegetal. Estudos recentes demonstram que o suprimento adequado desse micronutriente contribui para maior resistência a infecções, enquanto sua deficiência está frequentemente associada ao aumento da suscetibilidade a fungos e bactérias patogênicas (Abou seeda *et al.* 2021; Saldanha, 2023). Assim, a maior ocorrência de mosca-branca observada nos tratamentos com ausência de B e menores doses de K sugere uma possível relação entre o desequilíbrio nutricional e a redução da capacidade de resistência das mudas.

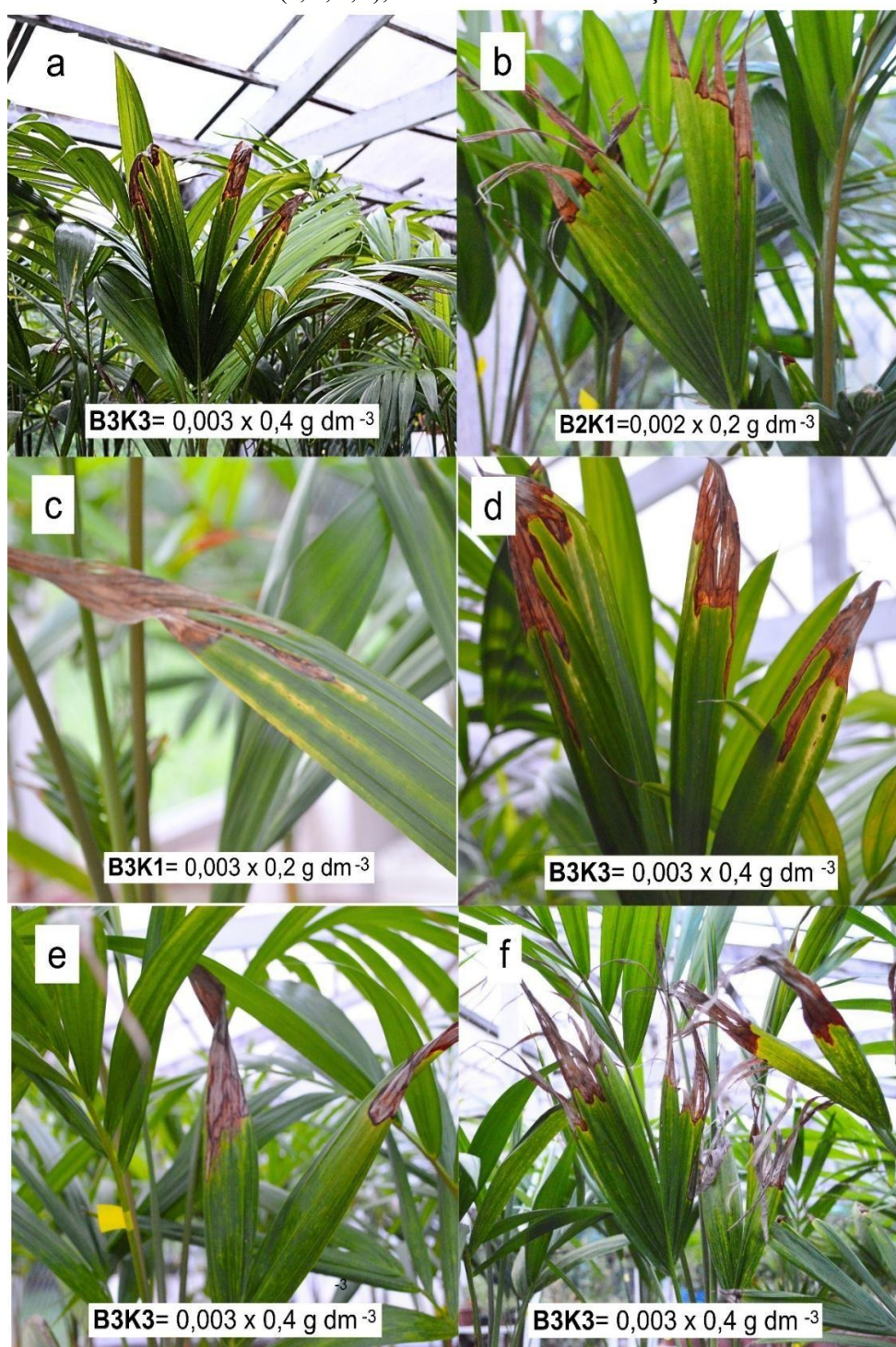
4.5.3. Sintomas de toxidez de B

Os sintomas de toxidez por B tornaram-se mais evidentes por volta de 130 dias após a implantação dos tratamentos, manifestando-se principalmente em folhas mais velhas (Figura 7). Inicialmente, observou-se clorose gradual, seguida de necrose marginal e queima das extremidades foliares, resultando na redução da área fotossinteticamente ativa das plantas. Nos tratamentos com maiores doses de B associadas ao fornecimento de K (B3K1 e B3K3), os sintomas caracterizaram-se ainda pelo surgimento de manchas pardas e pontuações necróticas internervais, evoluindo para intensa queima das margens foliares, acompanhada de enrugamento e encurvamento das lâminas.

Quando elevadas doses de B foram associadas à ausência de K (B3K0), verificou-se o agravamento dos sintomas, com intensa clorose, necrose marginal e queima foliar. Nessa condição, os sintomas de toxidez por B apresentaram grande semelhança com os observados na deficiência de K, principalmente quanto à ocorrência de cloroses e necroses em folhas mais velhas, dificultando a distinção visual entre os distúrbios nutricionais. Esse resultado ressalta a

importância da utilização de ferramentas complementares, como análises químicas de solo e tecido vegetal, para a correta interpretação do estado nutricional das plantas.

Figura 7- Sintomas visuais de toxidez por B em mudas de açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivadas em Latossolo Amarelo de textura média e submetidas a diferentes combinações de doses de B e K (g dm^{-3}). Observa-se clorose e necrose marginal com queima das extremidades foliares (a, b, c), manchas pardas e pontuações necróticas internervais (a, d), bem como enrugamento, encurvamento e ressecamento das lâminas foliares (a, c, e, f), característicos de condições de excesso de B.



Os sintomas observados concentram-se principalmente em folhas mais velhas, descrito como característico da toxidez por B e atribuído ao acúmulo progressivo do elemento ao longo do fluxo transpiratório (Abou Seeda *et al.* 2021). Segundo Lindolfo (2017), o excesso de B promove inicialmente clorose internerval e marginal, evoluindo para necrose, queima das extremidades e deformações foliares, sintomas compatíveis com aqueles verificados nas mudas de açaizeiro. De forma semelhante, Marschner (1995) e Roessner *et al.* (2006) relatam que o acúmulo do nutriente da base em direção ao ápice foliar favorece o aparecimento de cloroses e necroses, especialmente nas margens e pontas das folhas mais maduras.

Apesar de constituírem sintomas clássicos da toxidez por B, a intensidade e a forma de manifestação da clorose e da necrose foliar podem variar consideravelmente entre espécies com diferentes padrões de mobilidade floemática do nutriente, refletindo diferenças na absorção, redistribuição e acúmulo de B nos tecidos vegetais. Essa variabilidade pode explicar algumas particularidades observadas na expressão dos sintomas em mudas de açaizeiro (Lilay *et al.* 2024; Abou Seeda *et al.* 2021). Em geral, as folhas mais velhas são as primeiras a serem afetadas, com progressão dos sintomas para regiões mais jovens da planta. Em situações mais severas, podem ocorrer lesões pardas em bainhas foliares e caules. Assim como observado para a deficiência, a manifestação da toxidez por B também varia de acordo com a espécie e o genótipo vegetal (Abou Seeda *et al.* 2021).

Como salientado por Lindolfo (2017), a toxidez por B costuma apresentar semelhança com aqueles descritos para a deficiência de K, particularmente a ocorrência de clorose e necrose marginal em folhas mais velhas, dificulta a interpretação baseada exclusivamente na diagnose visual. Dessa forma, a utilização de ferramentas complementares, como análises químicas de solo e tecido vegetal, tornam-se fundamentais para a correta identificação dos distúrbios nutricionais e para a avaliação dos efeitos das diferentes combinações de doses de B e K sobre as mudas de açaizeiro.

4.5.4. Sintomas de toxidez de K

A respeito da toxidez de K, foram encontradas poucas descrições desse distúrbio em plantas, sendo os relatos ainda mais escassos em espécies da família Arecaceae, o que confirma a raridade de sua ocorrência. No presente estudo, foram observados sintomas compatíveis com toxidez por K (Figura 8), principalmente nas mudas submetidas às maiores doses de KCl. Os sintomas caracterizaram-se por clorose e necrose marginal, acompanhadas por lesões paralelas às nervuras foliares, que evoluíram para morte dos tecidos afetados e posterior fendilhamento das áreas necrosadas. A severidade dos sintomas foi mais pronunciada nos tratamentos que combinaram as maiores doses de K e B (B3K3), resultando em expressiva redução da área foliar fotossinteticamente ativa e comprometimento da qualidade das mudas.

Os sintomas observados quanto ao excesso de K, se deram especialmente por meio de cloroses e a necroses marginais em folhas mais velhas, bem como as lesões paralelas às nervuras, são semelhantes aos descritos por Alves *et al.* (2017) para palmeiras submetidas a desequilíbrios nutricionais envolvendo K. Embora os sintomas visuais da toxidez por K sejam pouco documentados, principalmente em Arecaceae, há evidências de que concentrações excessivas desse nutriente podem comprometer o crescimento vegetal e desencadear alterações fisiológicas decorrentes de sua toxicidade indireta. Nesses casos, os danos observados estão frequentemente associados ao antagonismo na absorção de outros nutrientes, especialmente Ca e Mg, resultando em deficiências secundárias e agravamento do estado nutricional das plantas (Malavolta *et al.* 1997; Fageria, 2001).

Além dos efeitos nutricionais, elevadas concentrações de K^+ na solução do solo podem aumentar a salinidade do meio radicular, provocando estresse osmótico e reduzindo a absorção de água e nutrientes essenciais. Como consequência, ocorre diminuição do crescimento vegetativo, aceleração da senescência foliar e redução da capacidade fotossintética das plantas. Pantha *et al.* (2022) observaram que altas concentrações de KCl promovem efeitos mais amplos do que aqueles relacionados apenas ao estresse osmótico, incluindo redução da assimilação de CO_2 , diminuição da área foliar e alterações fisiológicas mais severas quando comparadas a estresses induzidos por Na^+ .

Figura 8- Registros visuais de sintomas compatíveis com toxidez por K em mudas de açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivadas em Latossolo Amarelo de textura média e submetidas a diferentes combinações de doses de B e K (g dm^{-3}). Observam-se clorose, necrose e queima das extremidades foliares (A), além de manchas necróticas alongadas e necrose marginal em folhas mais velhas (B), associadas às maiores doses de KCl.



Por outro lado, estudos indicam que o excesso de K pode intensificar os efeitos da deficiência de B, uma vez que elevadas concentrações do macronutriente podem restringir a absorção de micronutrientes como B, Zn e Mn (Bergmann, 1992). Esse antagonismo nutricional pode contribuir para o agravamento dos sintomas observados nas mudas submetidas às maiores doses de K, especialmente quando associado a condições de desequilíbrio nutricional envolvendo o B.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

1. Não há interação significativa entre B e K sobre nenhuma das variáveis avaliadas. Os fatores atuam de forma independente.
2. O B tem efeito significativo sobre a circunferência do coleto (*CC*), a massa seca de raiz (*MSR*) e volume radicular (*VR*), que respondem de forma quadrática a variações nas doses empregadas, com ponto de máximo estimados próximos a $1,2 \text{ mg dm}^{-3}$ de B para *CC* e $1,3 \text{ mg dm}^{-3}$ para *MSR* e *VR*. Tanto a baixa disponibilidade quanto doses mais elevadas estão associados ao menor desenvolvimento dessas variáveis, impactando especialmente o sistema radicular das mudas de açazeiro.
3. A disponibilidade de B influencia significativamente a razão Ci/Ca , promovendo resposta quadrática negativa, com ponto de mínimo estimado em $0,0013 \text{ g dm}^{-3}$ de B, indicando que o suprimento desse nutriente pode alterar a relação entre o CO_2 intercelular e atmosférico e, consequentemente, as respostas fisiológicas da planta.
4. O aumento das doses de K_2O , na forma de KCl, promove redução linear na assimilação líquida de CO_2 , na condutância estomática e na transpiração, possivelmente associada a efeitos osmóticos ou iônicos decorrentes do aumento da concentração de sais no meio. Esses mecanismos, entretanto, devem ser investigados para confirmar sua relação com as respostas fisiológicas observadas.
5. A deficiência de B torna-se evidente a partir de aproximadamente 53 dias, afetando principalmente folhas jovens e o sistema radicular, com ocorrência de deformações, fragilidade foliar, rachaduras no estipe e necrose progressiva das raízes, evidenciando a importância do B para o adequado desenvolvimento vegetativo e radicular da planta.

6. A deficiência de K torna-se evidente a partir de aproximadamente 74 dias, manifestando-se principalmente nas folhas mais velhas, com clorose e necrose marginais, ressecamento, encurvamento e desfolha prematura, além de fragilidade dos estipes e maior ocorrência de mosca-branca associada à fumagina.
7. O excesso de B torna-se mais evidente a partir de aproximadamente 130 dias, principalmente nas folhas mais velhas, causando clorose, necrose marginal e queima das extremidades foliares, sintomas intensificados sob menor disponibilidade de K. Em combinações com altas doses de B e K, também foram observadas lesões foliares e redução da área foliar, embora a interação entre os nutrientes não tenha sido estatisticamente significativa.
8. Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o manejo adequado de B e K é fundamental para a formação de mudas de açaizeiro vigorosas e fisiologicamente equilibradas. O B requer atenção especial em razão da estreita faixa entre níveis adequados e condições de deficiência ou toxicidade, evidenciando a necessidade de criterioso ajuste das doses. Para o K, além da dose aplicada, a fonte do fertilizante deve ser cuidadosamente considerada, uma vez que o aumento da concentração de sais pode favorecer efeitos osmóticos e comprometer as trocas gasosas e o desenvolvimento das plantas. Dessa forma, o manejo desses nutrientes deve considerar não apenas o suprimento para atender às demandas nutricionais, mas também os possíveis efeitos decorrentes de doses excessivas. Novos estudos são necessários para aprofundar a compreensão das respostas fisiológicas, metabólicas e nutricionais ao B e K, bem como estabelecer faixas de suficiência e toxicidade ao longo dos diferentes estádios de desenvolvimento do açaizeiro.

REFERÊNCIAS

- ABOU SEEDA, M. A.; ABOU EL-NOUR, E. A.; YASSEN, A. A.; HAMMAD, S. A. Boron, structure, functions and its interaction with nutrients in plant physiology: a review. **Middle East Journal of Agriculture Research**, v. 10, n. 1, p. 117–179, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36632/mejar/2021.10.1.9>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/349764604_Boron_Structure_Functions_and_Its_In_Interaction_with_Nutrients_in_Plant_Physiology_A_Review. Acesso em: 12 nov. 2025.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, A. B.; VIECELLI, C. A.; PALUDO, F. S.; MOREIRA, N. P.; ROHR, O. Sintomas de deficiência de potássio (K). In: VIECELLI, C. A. (org.). **Guia de deficiências nutricionais em plantas**. Toledo, PR: PUCPR Câmpus Toledo; Grupo Marista; Assoeste, 2017. p. 60–66.

ARAÚJO, C. S. de; RUFINO, C. P. B.; BEZERRA, J. L. de S.; ANDRADE NETO, R. de C.; LUNZ, A. M. P. Crescimento de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) submetidas a diferentes doses de fósforo. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v. 5, n. 1, p. 102–111, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufac.br/index.php/SAJEBTT/article/view/1475>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ARAÚJO, F. D. R. R. de. **Efeito da omissão de nutrientes no crescimento e estado nutricional de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) var. verde-peso em Latossolo amarelo argiloso e arenoso**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias – Agroecossistemas Amazônicos) – Universidade Federal Rural da Amazônia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Belém, 2016.

ARNON, D. I. Prof. Dr. Hoagland. **Nature**, v. 165, p. 56–58, 1950.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico: setor de fertilizantes, 2001**. [S. l.]: ANDA, 2001. 156 p.

BARBOSA, Z.; SOARES, I.; CRISÓSTOMO, L. A. Crescimento e absorção de nutrientes por mudas de gravioleira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 519–522, 2003.

BERGMANN, W. **Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis**. 2. ed. Jena; New York: Gustav Fischer Publishing House, 1992. 741 p.

BEZERRA, J. L. S.; ANDRADE NETO, R. C.; LUNZ, A. M. P.; ARAÚJO, J. M.; ARAÚJO, C. S. Produção de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea*) em resposta a diferentes fontes e doses de potássio. **Enciclopédia Biosfera**, v. 17, n. 33, p. 348–360, 2020. DOI: https://doi.org/10.18677/EnciBio_2020C31.

BOARETTO, A. E.; BOARETTO, R. M.; CONTIN, T. L. M.; MURAOKA, T. É móvel ou imóvel o boro em laranjeira? **Laranja**, Cordeirópolis, v. 25, n. 1, p. 195–208, 2004.

BOVI, M. L. A. **Palmito pupunha: informações básicas para cultivo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1998. 50 p. (Boletim Técnico, 173).

BOVI, M. L. A.; GODOY, J. R. G.; SPIERING, S. H. Respostas de crescimento de pupunheira à adubação NPK. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 1, p. 161–166, 2002.

BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIÉGAS, I. J. M. (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1125022/recomendacoes-de-calagem-e-adubacao-para-o-estado-do-para>. Acesso em: 12 nov. 2025.

BRDAR-JOKANOVIC, M. Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 4, e1424, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21041424>.

BROSCHAT, T. K. Nutrient deficiencies of landscape and field-grown palms in Florida. **EDIS**, 2005. Disponível em: <https://journals.ashs.org>. Acesso em: 12 nov. 2025.

BROSCHAT, T. K. Palm nutrition and fertilization. **HortTechnology**, v. 19, n. 4, p. 690–694, 2009.

BROWN, P. H.; BELLALLOUI, N.; WIMMER, M. A.; BASSIL, E. S.; RUIZ, J.; HU, H.; et al. Boron in plant biology. **Plant Biology**, v. 4, n. 2, p. 205–223, 2002.

BROWN, P. H.; SHELPS, B. J. Boron mobility in plants. In: DELL, B.; BROWN, P. H.; BELL, R. W. **Boron in soils and plants: reviews**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997. p. 85–101.

BROWN, P. H.; ZHAO, F. J.; DOBERMANN, A. What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. **Plant and Soil**, v. 476, p. 11–23, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05171-w>.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 168, p. 521–530, 2005.

CAKMAK, I.; KURZ, H.; MARSCHNER, H. Short-term effects of boron, germanium and high light intensity on membrane permeability in boron deficient leaves of sunflower. **Physiologia Plantarum**, v. 95, n. 1, p. 11–18, 1995.

CAKMAK, I.; RÖMHELD, V. Boron deficiency-induced impairments of cellular functions in plants. **Plant and Soil**, v. 193, n. 1, p. 71–83, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004259808322>.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; REXACH, J.; GONZÁLEZ-FONTES, A. Boron in plants: deficiency and toxicity. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 50, n. 10, p. 1247–1255, 2008.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; REXACH, J.; HERRERA-RODRÍGUEZ, M. B.; NAVARRO-GOCHICOA, M. T.; GONZÁLEZ-FONTES, A. Boron deficiency and transcript level changes. **Plant Science**, v. 181, n. 2, p. 85–89, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.05.001>.

CASTRO, G. L. S.; RÊGO, M. C. F.; SILVESTRE, W. V. D.; BATISTA, T. F. V.; SILVA, G. B. Açaí palm seedling growth promotion by rhizobacteria inoculation. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 51, n. 1, p. 205–216, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-019-00159-2>.

CESARIN, V.; MESQUITA, J. A.; OLIVEIRA, S. J.; SANTOS, H. C. A.; RIBEIRO, N. M.; COSTA, Y. K. S.; SANTOS, I. L.; NASCIMENTO, R. S. M.; CARVALHO, L. B. Produção de mudas de açaizeiro. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.29372/rab202036>.

CHEN, A.; HUSTED, S.; SALT, D. E.; SCHJOERRING, J. K.; PERSSON, D. P. The intensity of manganese deficiency strongly affects root endodermal suberization and ion homeostasis. **Plant Physiology**, v. 181, n. 2, p. 729–742, 2019.

CHEN, S.; WANG, P.; KONG, W.; CHAI, K.; ZHANG, S.; YU, J.; ZHANG, X. Gene mining and genomics-assisted breeding empowered by the pangenome of tea plant *Camellia sinensis*. **Nature Plants**, v. 9, n. 12, p. 1986–1999, 2023.

COSTA, L. F. S.; CUNHA, A. H. N.; FERREIRA, E. M.; BRASIL, E. P. F.; FERREIRA, E. P. B. Aplicação de boro em feijoeiro e aspectos microbiológicos do solo. **Revista Mirante**, Anápolis, GO, v. 7, n. 2, 2014.

CUNHA, J. F.; FRANCISCO, E. A. B.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira: 2009 a 2012. **Informações Agronômicas**, n. 145, p. 1–28, 2014.

DE BANG, T. C.; HUSTED, S.; LAURSEN, K. H.; PERSSON, D. P.; SCHJOERRING, J. K. The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2446–2469, 2021.

DELL, B.; HUANG, L. Physiological response of plants to low boron. **Plant and Soil**, v. 193, n. 1, p. 103–120, 1997.

DONG, X.; JIANG, C.; WEI, S.; JIAO, H.; RAN, K.; DONG, R.; WANG, S. The regulation of plant lignin biosynthesis under boron deficiency conditions. **Physiologia Plantarum**, v. 174, e13815, 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Zoneamento edafoclimático do Estado do Pará para a cultura do açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.)**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002.

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, p. 1269–1290, 2001.

FAQUIN, V. **Diagnose do estado nutricional das plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2002. 77 p.

FARIAS NETO, J. T. **BRS Pai d'Égua: cultivar de açaí para terra firme com suplementação hídrica**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 7 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado Técnico, 317). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1114134/1/ComTec317.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

FARIAS NETO, J. T.; VASCONCELOS, M. A. M.; NOGUEIRA, A. K. M. **Produção, processamento e mercado para a cultura do açaí**. Fortaleza: Instituto Frutal, 2011.

FARQUHAR, G. D.; SHARKEY, T. D. Stomatal conductance and photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 33, p. 317–345, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.001533>.

FAVACHO, L. K. G. **Influência da densidade e adubação no desenvolvimento inicial de açaizeiros (*Euterpe oleracea* Mart.) em um ambiente de Cerrado no município de Macapá – AP**. 2017. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal) – Universidade do Estado do Amapá, Macapá, 2017.

FERNANDES, A. R.; MATOS, G. S. B.; CARVALHO, J. G. Nutritional deficiencies of macronutrients and sodium in peach palm seedlings. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, p. 1178–1189, 2013.

FERREIRA, A. dos S.; SILVA, D. A. S.; DEMARTELAERE, A. C. F.; PRESTON, H. A. F.; SILVA, T. P. de P.; MATA, T. C.; PAIVA, L. L. de; FERREIRA, M. dos S.; SOUZA, J. B. de; MEDEIROS, D. C. de; FREITAS, D. G.; CARVALHAES, M. A.; BEZERRA, V. S. **Boas práticas na cadeia de produção de açaí**. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

FERREIRA, C. P.; CRAVO, M. S.; FERREIRA, E. V. O. Fertilizantes minerais. In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de J. M. (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 73–75.

FERREIRA, E. A.; MENDONÇA, V.; SOUZA, H. A. de; RAMOS, J. D. Adubação fosfatada e potássica na formação de mudas de tamarindeiro. **Scientia Agraria**, v. 9, n. 4, p. 475–480, 2008.

FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. (ed.). **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

FLEXAS, J.; BOTA, J.; LORETO, F.; CORNIC, G.; SHARKEY, T. D. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. **Plant Biology**, v. 6, n. 3, p. 269–279, 2004.

FONTES, P. C. R. Diagnóstico do estado nutricional pelo método visual. In: FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2001. cap. 8, p. 63–86.

FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS. **Nota técnica: conjuntura da economia do açaí 2024**. Belém: FAPESPA, 2024. Disponível em: <https://www.fapespa.pa.gov.br/wp-content/uploads/2024/05/Nota-Tecnica-Conjuntura-da-Economia-do-Acai-2024-PUBLICACAO-2-.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

GAMA, J. R. V. et al. **Solos de várzea da Amazônia: características, classificação e potencial agrícola**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2005.

GEILFUS, C. M. Chloride: from nutrient to toxicant. **Plant and Cell Physiology**, v. 59, n. 5, p. 877–886, 2018.

GOLDBACH, H. E.; HUANG, L.; WIMMER, M. A. Boron functions in plants and animals: recent advances in boron research and open questions. In: XU, F.; GOLDBACH, H. E.; BROWN, P. H.; BELL, R. W.; FUJIWARA, T.; HUNT, C. D.; GOLDBERG, S.; SHI, L. (ed.). **Advances in plant and animal boron nutrition**. Dordrecht: Springer, 2007. p. 3–25.

GONÇALVES, G. K.; MEURER, E. J. Alterações nas concentrações de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 465–471, 2010.

GONÇALVES, J. L. M.; VALERI, S. V. Micronutrientes para culturas: eucalipto e pinus. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. (ed.). **Micronutrientes e**

elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal: CNPq; FAPESP; POTAFOS, 2001. p. 393–423.

GONZÁLEZ-FONTES, A.; HERRERA-RODRÍGUEZ, M. B.; MARTÍN-REJANO, E. M.; NAVARRO-GOCHICOA, M. T.; REXACH, J.; CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J. Root responses to boron deficiency mediated by ethylene. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, e1103, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01103>.

GUPTA, D. K.; VANDENHOVE, H.; INOUE, M. Role of phytochelatins in heavy metal stress and detoxification mechanisms in plants. In: **Heavy metal stress in plants**. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. p. 73–94.

GUPTA, S.; SHI, X.; LINDQUIST, I. E.; DEVITT, N.; MUDGE, J.; RASHOTTE, A. M. Transcriptome profiling of cytokinin and auxin regulation in tomato root. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 2, p. 695–704, 2013.

HANSEL, F. D.; OLIVEIRA, M. L. de. Importância dos micronutrientes na cultura da soja no Brasil. **Informações Agronômicas**, n. 153, p. 1–9, 2016.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. 7. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2005. 515 p.

HAWORTH, M. et al. Plant physiological analysis to overcome limitations to plant phenotyping. **Plants**, v. 12, n. 23, e4015, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12234015>.

HOMMA, A. K. O.; NICOLI, C. M. L.; MENEZES, A. J. E. A.; MATOS, G. B.; CARVALHO, J. E. U.; NOGUEIRA, O. L. **Custo operacional de açaizeiro irrigado no Nordeste Paraense**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 18 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 255).

HOMMA, A. K. O.; REBELLO, F. K. Aspectos econômicos da adubação e da calagem na Amazônia. In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de J. M. (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. pt. 1, cap. 14, p. 185–204.

HU, H.; BROWN, P. H. Absorption of boron by plant roots. **Plant and Soil**, v. 193, n. 1–2, p. 49–58, 1997.

HU, H.; BROWN, P. H. Localization of boron in cell walls of squash and tobacco and its association with pectin (evidence for a structural role of boron in the cell wall). **Plant Physiology**, v. 105, n. 2, p. 681, 1994.

HU, H.; BROWN, P. H.; LABAVITCH, J. M. Species variability in boron requirement is correlated with cell wall pectin. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. 2, p. 227–232, 1996.

HUANG, J. H.; CAI, Z. J.; WEN, S. X.; GUO, P.; YE, X.; LIN, G. Z.; CHEN, L. S. Effects of boron toxicity on root and leaf anatomy in two *Citrus* species differing in boron tolerance. **Trees**, v. 28, n. 6, p. 1653–1666, 2014.

KIRKBY, E. A. Plant growth and mineral nutrition. In: MARSCHNER, H. (ed.). **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1991. p. 261–262.

LAWSON, T.; BLATT, M. R. Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water use efficiency. **Plant Physiology**, v. 164, n. 4, p. 1556–1570, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.114.237107>.

LEMOS, W. P. Caracterização. In: **Cultivo do açaí**. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

LILAY, G. H.; THIÉBAUT, N.; DU MEE, D.; ASSUNÇÃO, A. G.; SCHJOERRING, J. K.; HUSTED, S.; PERSSON, D. P. Linking the key physiological functions of essential micronutrients to their deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 242, n. 3, p. 881–902, 2024.

LINDOLFO, M. M. **Produtividade e nutrição de açaizeiro irrigado em função de doses de boro no Nordeste Paraense**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufra.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1021/1/PRODUTIVIDADE%20E%20NUTRI%20C3%87%20C3%83O%20DE%20A%20C3%87AIZEIRO%20IRRIGADO.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

LINDOLFO, M. M.; MATOS, G. S. B. de; PEREIRA, W. V. da S.; FERNANDES, A. R. Productivity and nutrition of fertigated açaí palms according to boron fertilization. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 42, n. 2, e-601, 2020.

MACÍÁ, M. J. et al. Palm use in Northwestern South America: a quantitative review. **Botanical Review**, v. 77, p. 462–570, 2011.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MANFREDINI, D. **Cálcio e boro para soja-perene: características anatômicas e agrônomicas e concentração de nutrientes**. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, 2008.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. New York: Academic Press, 2012. 672 p.

MATOS, C. B. et al. Economic profile of two species of genus *Euterpe*, producers of açaí fruits, from the Pará and Amazonas States – Brazil. **International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology**, v. 2, n. 4, p. 1822–1828, 2017.

MATOS, G. S. B.; GAMA, M. A. P.; RODRIGUES, G. R.; GONÇALVES, D. A. M. **Sintomas de deficiência nutricional em palma de óleo**. Belém: os autores, 2020. 28 p. (Série Guias Práticos de Campo – Palma de Óleo, v. 1). ISBN 978-65-00-08227-2.

MELÉM JÚNIOR, N. J.; BATISTA, E. M. **Coleta de solo para análise: orientações**. 2. ed. atual. e rev. Macapá, AP: Embrapa Amapá, 2012.

MELNYK, L.; GONCHARUK, V.; BUTNYK, I.; TSAPIU, E. Boron removal from natural and wastewaters using combined sorption/membrane process. **Desalination**, v. 185, n. 1–3, p. 147–157, 2005.

- MENGEL, K.; KIRKBY, E. **Principles of plant nutrition**. 5. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849 p.
- MEYER, B. S.; ANDERSON, D. B.; BOHNING, R. H.; FRATIANNE, D. C. **Introduction to plant physiology**. 2. ed. New York: D. Van Nostrand, 1973.
- MINAMI, K.; TESSARIOLI NETO, J.; PENTEADO, S. R.; ESCARPARI FILHO, J. A. **Produção de mudas hortícolas de alta qualidade**. Piracicaba: ESALQ/SEBRAE, 1994. 155 p.
- MORENO, F.; MORENO, L. A.; MORENO, J. A.; MORENO, J. C.; MORENO, M. Impactos da estação seca na troca gasosa de progenitores da palma de óleo (*Elaeis guineensis*) e híbridos interespecíficos (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) sob condições de campo no leste da Colômbia. **Revista Palmas**, v. 43, n. 3, p. 45–58, 2022. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/1803/180350123004/>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 651–681, 2008.
- NASCIMENTO, W. M. O. **Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.)**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2008. 2 p. (Informativo Técnico Redes de Sementes da Amazônia, n. 18).
- OLIVEIRA, M. S. P. de; FARIAS NETO, J. T. de; QUEIROZ, J. A. L. de. Cultivo e manejo do açaizeiro para produção de frutos. In: ENCONTRO AMAZÔNICO DE AGRÁRIAS, 6., 2014, Belém, PA. **Anais [...]**. Belém, PA: UFRA, 2014.
- OLIVEIRA, M. S. P. de; LEMOS, M. A.; SANTOS, V. F. dos; SANTOS, E. O. dos. Correlações fenotípicas entre caracteres vegetativos e de produção de frutos em açaizeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 1–5, abr. 2000.
- OLIVEIRA, M. S. P.; CARVALHO, J. E. U.; NASCIMENTO, W. M. O. **Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.)**. Jaboticabal: FUNEP, 2000.
- OLIVEIRA, M. S. P.; FARIAS NETO, J. T.; MATTIETTO, R. A.; MOCHIUTTI, S.; CARVALHO, A. V. **Açaí (*Euterpe oleracea*)**. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017. 31 p.
- OLIVEIRA, M. S. P.; FARIAS NETO, J. T.; PENA, R. S. **Açaí: técnicas de cultivo e processamento**. Fortaleza: Instituto Frutal, 2007. 104 p.
- PANDEY, D. K.; PANDEY, N. Screening of wheat genotypes for their susceptibility to boron deficiency. **Research Environment and Life Sciences**, v. 1, p. 37–42, 2008.
- PANTHA, P.; OH, D.; LONGSTRETH, D.; DASSANAYAKE, M. Living with high potassium: balance between nutrient acquisition and K-induced salt stress signaling. **Plant Physiology**, v. 191, n. 2, p. 1102–1121, 2022.
- PINHEIRO, J. B.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; MOREIRA, A. S.; ALVES, M. C. Severidade da ferrugem da soja em função do suprimento de potássio e cálcio em solução nutritiva. **Revista Ceres**, v. 58, n. 1, p. 43–50, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000100007>.

PINHO, L. G. R. **Deficiência e formas de aplicação de boro em coqueiro anão verde**. 2008. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2008.

POTTOSIN, I.; SHABALA, S. Transport across chloroplast membranes: optimizing photosynthesis for adverse environmental conditions. **Molecular Plant**, v. 9, p. 356–370, 2016.

PRADO, R. M.; NATALE, W.; ROZANE, D. E. Níveis críticos de boro no solo e na planta para cultivo de mudas de maracujazeiro-amarelo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 305–309, 2006.

QUAGGIO, J. A.; MATTOS JR., D.; BOARETTO, R. M. Sources and rates of potassium for sweet orange production. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 3, p. 369–375, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000300015>.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; POTAFOS, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011.

RAIZER, M. **Pragas em açaí e pupunha: controle e manejo**. Belém, PA: Embrapa, 2016.

RAMOS, M. J. M. **Caracterização de sintomas de deficiência de macronutrientes e de boro em abacaxizeiro cultivar Imperial**. 2006. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2006.

REID, R.; HAYES, J. Mechanisms and control of nutrient uptake in plants. **International Review of Cytology**, v. 229, p. 73–114, 2003.

REIS, C. J.; SORATTO, R. P.; BISCARO, G. A.; KULCZYNSKI, S. M.; FERNANDES, D. S. Doses e modos de aplicação de boro na produção e qualidade fisiológica de sementes de feijão em solo de cerrado. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 55, n. 4, p. 258–264, 2008.

RIO TINTO. **Ficha de dados do produto: tetraborato penta-hidratado (Granubor – 15% B)**. 2024. Disponível em: <https://agricultura-brasil.borax.com/USBorax/media/assets/product-data-sheets/granubor-pt.pdf?ext=.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

RODRIGUES, M. C. S. F. **Rizobactéria e Fertiactyl GZ® aumentam a tolerância ao déficit hídrico e promovem a reidratação de mudas de açaizeiro**. 2023. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2023.

ROESSNER, U.; PATTERSON, J. H.; FORBES, M. G.; FINCHER, G. B.; LANGRIDGE, P.; BACIC, A. An investigation of boron toxicity in barley using metabolomics. **Plant Physiology**, v. 142, n. 3, p. 1087–1101, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.106.084053>.

SALDANHA, E. C. M. **Boro e doenças de plantas**. 2023. Documento técnico. Disponível em: <https://assets.lms.toolzz.media/41526587/public/boro-e-doencas-de-plantas-eduardo-cezar-medeiros-saldanha-5974d26f-f094-4631-a210-d435ca6e84f4.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SAMPAIO, T. F.; DALCIN, T. E.; BOGIANI, J. C.; MORI, E. S.; GUERRINI, I. A. Selection of eucalyptus clones and adjustment of potassium doses for extended drought in Bahia Savanna.

Revista Árvore, v. 40, n. 6, p. 1031–1039, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000600008>.

SANTANA, A. C.; CARVALHO, D. F.; MENDES, F. A. T. **Análise sistêmica da fruticultura paraense: organização, mercado e competitividade empresarial**. Belém: Banco da Amazônia, 2008. 255 p.

SANTOS, M. R. S.; VITORINO, M. I.; BRAGA, C. C.; FERREIRA JÚNIOR, J. Monthly precipitation patterns in the Belém metropolitan mesoregion: use of CMORPH and principal components. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 7, p. 2164–2179, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160164>.

SHIMOTOHNO, A.; SOTTA, N.; SATO, T.; DE RUVO, M.; MARÉE, A. F.; GRIENEISEN, V. A.; FUJIWARA, T. Mathematical modeling and experimental validation of the spatial distribution of boron in the root of *Arabidopsis thaliana* identify high boron accumulation in the tip and predict a distinct root tip uptake function. **Plant and Cell Physiology**, v. 56, n. 4, p. 620–630, 2015.

SILVA, A. L. P.; SENA, W. L.; LÉLIS, A.; VIANA, J. S. et al. Avaliação do estado nutricional por meio de diagnose visual em açaizeiro sob cultivo sem solo na Amazônia. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 6, e15293, 2025. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n6-032>.

SILVA, C. V. M. da. **Cronossequência de deterioração na anatomia de madeiras tropicais estocadas em área de mineração**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais – Manejo de Ecossistemas Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, 2018.

SILVA, H. de J. A. da. **Estratégias ecológicas e atributos funcionais de espécies lenhosas de floresta de restinga**. 2019. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas – Botânica Tropical) – Universidade Federal Rural da Amazônia; Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, 2019.

SILVA, R. C.; BAIRD, R.; DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Slow and fast-release boron sources in potash fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 5, p. 1185–1194, 2018.

SOBRAL, L. F.; BARRETTO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. dos. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solo**. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. (Documentos, 206).

SOUSA, T. S. **Crescimento vegetativo em mudas de diferentes genótipos de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) submetidos ao estresse hídrico**. 2021. 43 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Aplicada à Agropecuária – Biotecnologia Metabólica) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TUCCI, C. A. F.; LIMA, H. N.; LESSA, J. F. Adubação nitrogenada na produção de mudas de mogno (*Swietenia macrophylla* King). **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, n. 2, p. 289–294, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000200007>.

UENO, H.; MAEDA, T.; KATSUYAMA, N.; KATO, Y.; MATSUO, S.; YANO, K.; ANDO, A.; NAGASUGA, K.; YAMADA, M.; IMANISHI, S. Cation measurements and gene expression analysis suggest tomato leaf marginal necrosis is caused by a jasmonate signal induced by K⁺ starvation in the tip region of leaflets. **Horticulture Journal**, v. 87, p. 206–213, 2018.

VELOSO, C. A. C.; SILVA, A. R.; SALES, A. Efeito do boro e potássio na formação do açaizeiro em Latossolo Amarelo do Nordeste Paraense. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 22, p. 1059–1066, 2015.

VELOSO, C. A. C.; VIEGAS, I. J. M.; FRAZÃO, D. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, A. R.; SANTOS, C. D. M. Resposta do açaizeiro à aplicação de boro, em relação a doses de potássio em Latossolo Amarelo do Nordeste Paraense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **O solo e a produção de bioenergia: perspectivas e desafios: resumos**. Fortaleza: SBSCS, 2009. p. 199.

VIÉGAS, I. de J. M.; CRAVO, M. da S.; ARAÚJO, S. M. B. Açaizeiro. In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de J. M. (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. pt. 5, cap. 2, p. 323–325.

VIÉGAS, I. de J. M.; MEIRELES, R. de O.; FRAZÃO, D. A. C.; CONCEIÇÃO, H. E. O. da. Avaliação da fertilidade de um Latossolo Amarelo textura média para o cultivo do açaizeiro no estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n. 52, p. 23–36, 2009.

VIÉGAS, I. J. M.; GONÇALVES, A. A. S.; FRAZÃO, D. A. C.; CONCEIÇÃO, H. E. O. Efeito das omissões de macronutrientes e boro na sintomatologia e crescimento de plantas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.). **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n. 50, p. 129–141, 2008.

VIÉGAS, I. J. M.; THOMAZ, M. A. A.; SILVA, J. F. D.; CONCEIÇÃO, H. E. O. D.; NAIFF, A. P. M. Efeito da omissão de macronutrientes e boro no crescimento, nos sintomas de deficiências nutricionais e na composição mineral de plantas de camucamuzeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 26, p. 315–319, 2004.

WANG, M.; ZHENG, Q.; SHEN, Q.; GUO, S. The critical role of potassium in plant stress response. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, n. 4, p. 7370–7390, 2013.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: a review. **Annals of Botany**, v. 88, n. 6, p. 967–988, 2001.

WIMMER, M. A.; EICHERT, T. Mechanisms for boron deficiency mediated changes in plant water relations. **Plant Science**, v. 203, p. 25–32, 2013.

WU, X.; RIAZ, M.; YAN, L.; DU, C.; LIU, Y.; JIANG, C. Boron deficiency in trifoliolate orange induces changes in pectin composition and architecture of components in root cell walls. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, e1882, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01882>.

YAMADA, T. Boro: será que estamos aplicando a dose suficiente para o adequado desenvolvimento das plantas? **Informações Agrônomicas**, n. 90, 2000.

ZHANG, C.; HE, M.; WANG, S.; CHU, L.; WANG, C.; YANG, N.; XU, F. Boron deficiency-induced root growth inhibition is mediated by brassinosteroid signalling regulation in *Arabidopsis*. **The Plant Journal**, v. 107, n. 2, p. 564–578, 2021.

ZHOU, G.; SUN, X.; ZHANG, L.; ZENG, X.; LIU, G.; SHENG, O. Lignin metabolism plays an essential role in the formation of corky split vein caused by boron deficiency in ‘Newhall’ navel orange (*Citrus sinensis* Osb.). **Scientia Horticulturae**, v. 294, e110763, 2022.