

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Partição de carbono e eficiência de uso de nutrientes em mudas de macaúba e
diagnose multinutriente em palma de óleo**

Mylena Lacerda Bahia
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

MYLENA LACERDA BAHIA

**Partição de carbono e eficiência de uso de nutrientes em mudas de macaúba e
diagnose multinutriente em palma de óleo**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Julio Cesar Lima Neves

Coorientadores: Leonardo D. Pimentel
Junia Maria Clemente

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Bahia, Mylena Lacerda, 1998-
B151p Partição de carbono e eficiência de uso de nutrientes em
2026 mudas de macaúba e diagnose multinutriente em palma de óleo /
Mylena Lacerda Bahia. – Viçosa, MG, 2026.
1 dissertação eletrônica (115 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Júlio César Lima Neves.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.206>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Fisiologia vegetal. 2. Análise foliar. 3. *Elaeis guineensis*.
4. *Acrocomia aculeata*. 5. Macaúba - Mudas - Nutrição.
6. Dendezeiro - Nutrição. I. Neves, Júlio César Lima, 1955-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.
Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.
III. Título.

CDD 22. ed. 571.2

MYLENA LACERDA BAHIA

**Partição de carbono e eficiência de uso de nutrientes em mudas de macaúba e
diagnose multinutriente em palma de óleo**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

Mylene Lacerda Bahia
Autora

Julio Cesar Lima Neves
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 14/05/2026 às 14:02:06 e pelo orientador em 14/05/2026 às 14:53:59. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **3AFV.ZZ2K.GYZX** e clique no botão 'Validar documento'.

A minha mãe, pilar da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Andréa pelo apoio e amor incondicional. Aos meus irmãos Natany, Géssica e Rafael pela amizade e incentivo. Aos meus sobrinhos Alice, Léo e Francisco pelo amor que me proporcionam. E ao meu pai pelo amor.

Ao meu noivo e melhor amigo Sandro pelo companheirismo, paciência e amor durante todo o mestrado.

Agradeço ao meu orientador Júlio César Neves, pela compreensão e companheirismo nos momentos que precisei, pelos ensinamentos durante esses anos de convivência e pela grande contribuição na minha formação profissional. Aos meus Coorientadores Leonardo e Júnia pelas contribuições para minha formação.

Agradeço imensamente as minhas companheiras da República Everest pela amizade, apoio e carinho desde a graduação.

Aos meus amigos de Viçosa e Eunápolis pelo carinho, amor e apoio.

Ao Programa Solos e Nutrição de Plantas – UFV, pela oportunidade e apoio durante a minha trajetória.

A todos que de alguma forma participaram e contribuíram para a realização deste trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

BAHIA, Mylena Lacerda, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Partição de carbono e eficiência de uso de nutrientes em mudas de macaúba e diagnose multinutriente em palma de óleo.** Orientador: Julio Cesar Lima Neves. Coorientadores: Leonardo Duarte Pimentel e Junia Maria Clemente.

A nutrição mineral é essencial para o crescimento, produtividade e sustentabilidade de sistemas produtivos. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi analisar o acúmulo e partição de biomassa e a eficiência no uso de carbono e nutrientes em mudas de macaúba e avaliar a inclusão do cloro (Cl), sódio (Na) e alumínio (Al) na diagnose nutricional composicional da palma de óleo. No primeiro estudo, foram analisadas mudas de *Acrocomia aculeata* avaliadas em viveiro quanto a variáveis morfológicas, fisiológicas e nutricionais. O crescimento esteve associado principalmente à expansão coordenada da biomassa e da superfície foliar, a qual integra estrutura, fisiologia e estado nutricional, enquanto a eficiência do uso de carbono exerce papel secundário. O acúmulo de nutrientes na folha relacionou-se predominantemente à massa e à extensão do sistema radicular. O caule saxofone apresentou elevada participação na biomassa total, atuando como compartimento central na alocação interna de recursos. No segundo estudo, foram utilizados dados de plantios comerciais da *Elaeis guineensis* no estado do Pará, pelo método da Diagnose Nutricional Composicional (CND) em estruturas tradicionais e expandidas, com inclusão de Cl, Na e Al. Avaliaram-se os efeitos sobre as normas multinutrientes, o balanço iônico, a organização multivariada dos índices nutricionais e os teores ótimos estimados. Os resultados indicaram que o Cl atua como principal elemento estruturante da reorganização diagnóstica, enquanto o Na apresentou efeitos secundários e o Al comportamento estruturalmente neutro. Em conjunto, os estudos contribuem para o aprimoramento da produção de mudas de macaúba e do manejo nutricional da palma de óleo.

Palavras-chave: *Elaeis guineensis*; *Acrocomia aculeata* ; palma de óleo – balanço iônico; macaúba- área foliar específica

ABSTRACT

BAHIA, Mylena Lacerda, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Carbon partitioning and nutrient use efficiency in macaúba seedlings and multinutrient diagnosis in oil palm.** Adviser: Julio Cesar Lima Neves. Co-advisers: Leonardo Duarte Pimentel and Junia Maria Clemente.

Mineral nutrition is essential for the growth, productivity, and sustainability of production systems. Accordingly, this study aimed to analyze biomass accumulation and partitioning, as well as carbon- and nutrient-use efficiency in macaúba seedlings, and to evaluate the inclusion of chlorine, sodium, and aluminum in the compositional nutrient diagnosis of oil palm. In the first study, *Acrocomia aculeata* seedlings were evaluated under nursery conditions for morphological, physiological, and nutritional variables. Growth was mainly associated with the coordinated expansion of biomass and leaf surface area, which integrates structure, physiology, and nutritional status, while carbon-use efficiency played a secondary role. Nutrient accumulation in leaves was predominantly related to root system mass and extension. The saxophone stem showed a high contribution to total biomass, acting as a central compartment in internal resource allocation. In the second study, data from commercial plantations of *Elaeis guineensis* in the state of Pará were analyzed using the Compositional Nutrient Diagnosis (CND) method in traditional and expanded structures, including chlorine, sodium, and aluminum. The effects on multinutrient norms, ionic balance, multivariate organization of nutritional indices, and estimated optimal nutrient levels were evaluated. The results indicated that chlorine acts as the main structuring element of diagnostic reorganization, whereas sodium showed secondary effects and aluminum exhibited structurally neutral behavior. Overall, these studies contribute to improving macaúba seedling production and oil palm nutritional management.

Keywords: *Elaeis guineensis*; *Acrocomia aculeata*; oil palm – ionic balance; macaúba – specific leaf area

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERÊNCIAS	11
CAPÍTULO 1.....	12
Acúmulo e Partição de Biomassa e Eficiência de Uso de Carbono e Nutrientes em Mudanças de Macaúba.....	12
RESUMO	12
ABSTRACT	14
1. INTRODUÇÃO	15
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
2.1. Material vegetal e condições experimentais	17
2.2 Avaliações fisiológicas.....	19
2.3. Avaliações morfológicas e de biomassa	19
2.4 Morfologia e arquitetura do sistema radicular	20
2.5. Composição mineral e conteúdo de nutrientes	21
2.6. Partição de biomassa e índices de eficiência.....	22
2.7. Avaliação do papel do caule saxofone	24
2.8. Área foliar (AF) como atributo central.....	24
2.9. Análises estatísticas.....	24
3.RESULTADOS	25
3.1 Variabilidade da população e gradiente funcional associado à área foliar.....	25
3.2. Composição de biomassa e alocação entre órgãos	28
3.3 Área foliar específica	29
3.4. Relações entre área foliar e nutrição mineral	30
3.4.1 Teores foliares de nutrientes.....	30
3.4.2 Conteúdo de nutrientes nas folhas e relações com a área foliar	30
3.4.3 Eficiência de Utilização de Nutrientes Minerais (EU)	34
3.4.4 Eficiência integrada de aquisição e suprimento nutricional à folha (EATf).....	36
3.5 Morfologia e arquitetura do sistema radicular ao longo do gradiente de área foliar.....	38
3.6 Variáveis fisiológicas ao longo do gradiente de área foliar	39
3.7 Análise multivariada das relações entre porte, estrutura radicular, nutrição e fisiologia (PCA)	41
4. DISCUSSÃO	44
4.1 Porte da planta como eixo integrador das superfícies de aquisição	44
4.2 Eficiência do investimento em carbono na superfície fotossintetizante.....	46
4.3 Arquitetura do sistema radicular e eficiência integrada de suprimento nutricional à folha (EATf)	48
4.4 Relações entre nutrientes minerais e crescimento	50
4.5 Regulação fisiológica do uso da água e do carbono ao longo do gradiente de porte	51
4.6. Papel funcional do caule saxofone na modulação da alocação de biomassa e das superfícies de aquisição	53
5. CONCLUSÕES	56
6. REFERÊNCIAS	57
CAPÍTULO 2.....	60
Cloro na Diagnose Nutricional Composicional da Palma De Óleo	60
RESUMO	60
ABSTRACT	62
1. INTRODUÇÃO	64
2. OBJETIVO GERAL	66
2.1. Objetivos específicos.....	66

3. MATERIAL E MÉTODOS	67
3.1 Área de estudo e conjunto de dados.....	67
3.2 Diagnose nutricional composicional (CND)	69
3.3 Estratégias diagnósticas	70
3.3.1 Faixas “fixas” de limiares (análogas a Beaufiles)	70
3.3.2 Referências internas específicas por talhão (classes de PRA).....	70
3.4 Análise de concordância e concordância diagnóstica	70
3.5 Análise do balanço iônico	70
3.5.1 Identidade de modelos de regressão entre estratos de produtividade	71
3.6 Alinhamento funcional entre desequilíbrio multinutriente e produtividade relativa	72
3.7 Análises multivariadas e univariadas com modelos mistos.....	72
4. RESULTADOS	73
4.1 Reorganização das normas multinutrientes com a expansão composicional	73
4.2 Concordância diagnóstica e reorganização estrutural do espaço composicional	76
4.2.1 Conjunto de nutrientes tradicional (11) como referência: efeitos das inclusões	76
4.2.2 Influência do critério diagnóstico sob o conjunto de nutrientes tradicional (11)	78
4.2.3 Conjunto de nutrientes completo (14) como referência: efeitos das exclusões	78
4.2.4 Critério diagnóstico e estabilidade sob o conjunto de nutrientes completo (14)	80
4.2.5 Inclusões versus exclusões	80
4.3 Implicações Agronômicas da reorganização diagnóstica induzida por Cl, Na e Al	80
4.3.1 Estrutura funcional das classes diagnósticas.....	81
4.3.2 Conjunto de nutrientes tradicional como referência: implicações agronômicas das inclusões	81
4.3.3 Conjunto de nutrientes completo como referência: implicações agronômicas das exclusões.....	87
4.3.4 Faixas fixas versus PRA: consequências para a tomada de decisão.....	92
4.3.5 Assertividade diagnóstica e implicações para o manejo nutricional	94
4.4 Balanço iônico	94
4.5 Relações multivariadas da composição nutricional foliar após a inclusão de Cl, Na e Al	97
4.6 Alinhamento funcional entre desequilíbrio multinutriente e produtividade relativa	99
4.7 Deslocamentos nos teores ótimos composicionais de nutrientes.....	101
5. DISCUSSÃO	108
5.1 Cloro como agente dominante do reancoramento eletroquímico.....	108
5.2 Contrastes estruturais: sódio e alumínio como efeitos translacionais	108
5.3 Estabilidade estrutural ao longo do gradiente de produtividade	109
5.4 Multivariada do equilíbrio nutricional.....	110
5.5 Alinhamento funcional com a produtividade relativa	110
5.6 Robustez diagnóstica: faixas fixas <i>versus</i> PRA	110
5.7 Implicações quantitativas: teores ótimos como propriedades emergentes	111
5.8 Síntese interpretativa	111
6. CONCLUSÕES	112
CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
7. REFERÊNCIAS	114

INTRODUÇÃO GERAL

As palmeiras constituem um grupo botânico de grande relevância ecológica e econômica nas regiões tropicais, com destaque para espécies de interesse agrícola e agroindustrial, como a palma de óleo (*Elaeis guineensis*) e a macaúba (*Acrocomia aculeata*) (Cogo et al., 2020; Silva & Feitosa, 2025). Essas espécies caracterizam-se por elevada capacidade produtiva, longevidade e expressiva acumulação de biomassa ao longo do ciclo de vida, o que impõe demandas específicas à nutrição mineral e ao manejo dos recursos (Moreira et al., 2024; Moreira et al., 2025; Rocha, 2025; Khasanah et al., 2015).

A produção de biomassa em plantas perenes resulta da integração entre assimilação de carbono (C), absorção de água e nutrientes minerais, alocação interna e construção de estruturas funcionais (Yin et al., 2019). Diferentemente de culturas anuais, palmeiras acumulam biomassa de forma contínua e prolongada, com forte dependência das estratégias de partição entre órgãos vegetativos, superfícies de aquisição de recursos e compartimentos de reserva. A compreensão desses processos é essencial para o entendimento do crescimento e do desempenho produtivo dessas espécies (Soares et al., 2016).

Do ponto de vista funcional, a expansão das superfícies de aquisição de recursos, em especial da superfície foliar responsável pela assimilação de C, constitui um dos principais determinantes do crescimento vegetal. A construção dessas superfícies envolve custos substanciais de C e nutrientes minerais, de modo que a eficiência com que esses recursos são convertidos em área fotossinteticamente ativa influencia diretamente o desempenho da planta (Pantin et al., 2011). Em palmáceas, essa dinâmica é modulada por características estruturais específicas, como a arquitetura da parte aérea, o sistema radicular e a presença de órgãos especializados de armazenamento (Goodman et al., 2013).

A nutrição mineral desempenha papel central nesse contexto, não apenas como fator limitante do crescimento, mas como elemento estruturante do funcionamento da planta (Taiz et al., 2017). O estado nutricional observado nos tecidos resulta da interação entre disponibilidade de nutrientes no solo, eficiência de aquisição pelo sistema radicular, transporte e alocação interna, além da demanda imposta pela construção e manutenção da biomassa (Marschener, 2012; Siddiqui; Glass, 1981) Assim, a composição mineral da planta deve ser interpretada como resultado integrado desses processos, e não como resposta direta e isolada ao suprimento externo de nutrientes.

Nesse cenário, abordagens baseadas exclusivamente na interpretação isolada de concentrações foliares apresentam limitações, particularmente em culturas perenes. Métodos multinutrientes de diagnose nutricional foram desenvolvidos para considerar explicitamente a interdependência entre nutrientes imposta pela composição mineral dos tecidos, permitindo a análise integrada do estado nutricional em um espaço multivariado e sua interpretação em relação ao desempenho produtivo (Parent & Dafir, 1992).

Esta dissertação aborda aspectos centrais da produção e da nutrição mineral em palmeiras, organizando-se em dois capítulos complementares. O primeiro capítulo concentra-se no crescimento inicial de plantas de macaúba, avaliando o acúmulo e a partição de biomassa, a construção das superfícies foliar e radicular e as eficiências de uso de C e de nutrientes minerais associadas à formação da superfície fotossintetizante. São analisados, de forma integrada, atributos morfológicos, fisiológicos e nutricionais, com ênfase nos determinantes estruturais do crescimento na fase de muda.

O segundo capítulo dedica-se à diagnose nutricional da palma de óleo em condições comerciais de cultivo, empregando uma abordagem multinutriente baseada na Diagnose Nutricional Composicional. O capítulo avaliou como diferentes estruturas composicionais influenciam a interpretação diagnóstica e a inferência de referências nutricionais associadas ao equilíbrio multinutriente, ampliando o entendimento do estado nutricional da cultura em escala produtiva.

Ao longo da dissertação, são abordados diferentes aspectos do crescimento, da produção de biomassa e da nutrição mineral em palmeiras tropicais, a partir de perspectivas distintas e complementares. Os capítulos exploram contextos produtivos específicos, como processos relacionados à construção da planta, ao uso de recursos e à interpretação do estado nutricional contribuem para o entendimento do desempenho dessas culturas. Nesse sentido, este trabalho busca oferecer subsídios conceituais e metodológicos para o estudo do crescimento e da produção de biomassa, bem como da nutrição, em palmeiras, com implicações para o manejo, a diagnose nutricional e o desenvolvimento de abordagens analíticas quantitativas aplicadas a essas culturas.

REFERÊNCIAS

- COGO, M. R. M.; OSÓRIO, T. M.; SANTOS, N. L.; BACEGA, A.; SOUZA, V. Q. **O gênero Butia (Arecaceae) com ênfase nas espécies Butia exilata e Butia lallemantii: uma revisão.** Research, Society and Development, v. 9, n.12, e3691210675, 2020.
- GOODMAN, R. C.; FRANKLIN, D. C.; PIRES, J. M.; STROPP, J.; COSTA, F. R. C.; PITMAN, N. C. A. **Amazon palm biomass and allometry.** Forest Ecology and Management, v. 310, p. 994–1004, 2013.
- KHASANAH, N.; VAN NOORDWIJK, M.; NINGSIH, H. **Aboveground carbon stocks in oil palm plantations and the threshold for carbon-neutral vegetation conversion on mineral soils.** Cogent Environmental Science, v. 1, p. 1-18, 2015. DOI: 10.1080/23311843.2015.1119964.
- MARSCHENER, P. **Marschener's Mineral Nutrition of Higher Plants.** 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012.
- MOREIRA, S. L. S.; IMBUZEIRO, H. M. A.; SANTOS, R. A. F.; SILVA, G. C. C.; LEITE, H. G.; PIMENTEL, L. D.; FERNANDES, R. B. A. **Carbon accumulation in cultivated macauba trees can be estimated and projected using allometric equations.** Industrial Crops & Products, v. 226, art. 120682, p. 1-7, 2025. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.120682
- MOREIRA, S. L. S.; SANTOS, R. A. F.; PAES, E. C.; BAHIA, M. L.; CERQUEIRA, A. E. S.; PARREIRA, D. S.; IMBUZEIRO, H. M. A.; FERNANDES, R. B. A. **Carbon accumulation in the soil and biomass of macauba palm commercial plantations.** Biomass and Bioenergy, v. 190, p. 1-12, 2024. DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107384.
- Pantin F, Simonneau T, Rolland G, Dauzat M, Muller B. **Control of leaf expansion: a developmental switch from metabolics to hydraulics.** Plant Physiol. 2011 Jun;156(2):803-15. doi: 10.1104/pp.111.176289. Epub 2011 Apr 6. PMID: 21474437; PMCID: PMC3177277.
- PARENT, L.E; DAFIR, M. **A Theoretical Concept of Compositional Nutrient Diagnosis.** J. AMER.Soc. HORT. SCI. 117(2):239-242. 1992.
- ROCHA, L. E. S. **O cultivo da Palma de óleo (elaeis guineenses Jacq.) na Amazônia Brasileira. Do Solo à Colheita Princípios e Práticas da Produção Vegetal.** Editora científica. ISBN 978-655360-886-6. Vol 1, 2025.
- SILVA, N. F.; FEITOSA, M. T. L. **Aspectos botânicos, ecológicos e econômicos da família Arecacea: uma revisão narrada.** Universidade Federal de Pernambuco, 2025.
- SIDDIQUI, M. Y.; GLASS, A. D. M. **Utilization index: a modified approach to the 98 estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants.** Journal of Plant Nutrition, v. 4, n. 1, p. 289–302, 1981.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia vegetal.** 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

CAPÍTULO 1

Acúmulo e Partição de Biomassa e Eficiência de Uso de Carbono e Nutrientes em Mudanças de Macaúba

RESUMO

O entendimento do crescimento de mudas de *Acrocomia aculeata* na fase de viveiro requer uma abordagem integrada dos atributos estruturais, nutricionais e fisiológicos, bem como das eficiências de uso do carbono (C) e dos nutrientes minerais associadas à construção das superfícies de aquisição de recursos. Apesar da importância crescente da macaúba, ainda são limitados os estudos que analisam, de forma conjunta, como esses atributos e eficiências se articulam durante o estabelecimento inicial da planta. Foram avaliadas mudas cultivadas em condições de viveiro, quantificando-se variáveis morfológicas, biométricas, fisiológicas e nutricionais. As medições incluíram área foliar total e específica, massas de matéria seca dos compartimentos da parte aérea e do sistema radicular, área superficial de raízes, teores e conteúdos foliares de macro e micronutrientes, variáveis instantâneas de trocas gasosas e índices de eficiência de utilização do C e de nutrientes minerais. Os resultados foram analisados por meio de regressões e análises de correlação, e, visando integrar os diferentes conjuntos de variáveis e identificar padrões funcionais de crescimento, alocação e eficiências de uso de C e nutrientes minerais, por meio da análise de componentes principais (PCA). Os resultados indicam que o crescimento de mudas de macaúba, na fase de viveiro, está principalmente associado à expansão coordenada da biomassa e da extensão da superfície foliar, a qual atua como variável integradora entre estrutura, fisiologia e estado nutricional, enquanto a eficiência estrutural de uso do C (área foliar específica) exerce papel secundário. O acúmulo de nutrientes na folha associa-se predominantemente à massa e à extensão da superfície radicular, sendo secundário o efeito de sua arquitetura. A eficiência de utilização de nutrientes minerais aumenta com a área foliar, com padrões dependentes do nutriente. As taxas instantâneas de assimilação líquida de C e os índices instantâneos de uso da água são predominantemente controlados pela condutância estomática, evidenciando um desacoplamento parcial entre investimentos estruturais de longo prazo e a regulação fisiológica de curto prazo. O caule saxofone apresenta elevada participação na biomassa total, atuando como compartimento estrutural de acúmulo associado à alocação interna de biomassa. Em conjunto, os resultados contribuem para um entendimento funcional do crescimento de mudas de macaúba em viveiro, destacando o papel dominante da expansão estrutural e das superfícies de aquisição sobre as variações nas

eficiências fisiológicas e nutricionais, contribuindo para o manejo de mudas em sistemas de produção e o desenvolvimento de modelos ecofisiológicos de base processual.

Palavras-chave: *Acrocomia aculeata*, Área Foliar Específica, Raízes, Superfície-de-Aquisição.

ABSTRACT

Understanding the growth of *Acrocomia aculeata* seedlings during the nursery phase requires an integrated assessment of structural, nutritional, and physiological attributes, as well as the efficiencies of carbon and mineral nutrient use associated with the construction of resource-acquisition surfaces. Despite the increasing importance of macaúba, few studies have jointly examined how these attributes and efficiencies interact during early plant establishment. This study evaluated seedlings grown under nursery conditions, quantifying morphological, biometric, physiological, and nutritional variables. Measurements included total and specific leaf area, dry matter of aboveground compartments and the root system, root surface area, foliar concentrations and contents of macro- and micronutrients, instantaneous gas-exchange parameters, and indices of carbon- and nutrient-use efficiency. The results were analyzed using regression and correlation analyses and, in order to integrate the different variable sets and identify functional patterns of growth, biomass allocation, and efficiencies of carbon and mineral nutrient use, principal component analysis (PCA) was applied. Seedling growth in the nursery phase was primarily associated with the coordinated expansion of biomass and leaf surface area, which acted as an integrative variable linking structure, physiology, and nutritional status, whereas structural carbon-use efficiency (specific leaf area) played a secondary role. Nutrient accumulation in leaves was mainly associated with root biomass and root surface area, while the effect of root architectural traits was secondary. The efficiency of mineral nutrient use increased with leaf area, with nutrient-specific patterns. Instantaneous rates of net carbon assimilation and indices of water-use efficiency were predominantly controlled by stomatal conductance, indicating a partial decoupling between long-term structural investments and short-term physiological regulation. The saxophone stem accounted for a substantial proportion of total biomass, acting as a structural storage compartment associated with internal biomass allocation. Overall, these results contribute to a functional understanding of macaúba seedling growth in nursery conditions, highlighting the dominant role of structural expansion and resource-acquisition surfaces over variations in physiological and nutritional efficiencies, and providing conceptual support for seedling management strategies and the development of process-based ecophysiological growth models.

Keywords: *Acrocomia aculeata*, specific leaf area, roots, acquisition surface.

1. INTRODUÇÃO

A aquisição de luz, dióxido de carbono, água e nutrientes minerais pelas plantas depende fundamentalmente do tamanho, da estrutura e do funcionamento de interfaces especializadas com o ambiente, comumente denominadas superfícies de aquisição de recursos. As folhas constituem a principal superfície para a assimilação de carbono (C) via fotossíntese, enquanto as raízes formam a interface responsável pela absorção de água e nutrientes do solo. A construção e a manutenção dessas superfícies representam importantes drenos de C e nutrientes e, conseqüentemente, desempenham papel central na determinação da eficiência de crescimento das plantas, das estratégias de uso de recursos e do desempenho em ambientes heterogêneos (Chapin et al., 1990; Poorter et al., 2009).

Sob uma perspectiva funcional, a eficiência com que as plantas convertem C assimilado em superfícies de aquisição é comumente avaliada por meio de atributos como a área foliar específica (AFE) para folhas e o comprimento ou a área de superfície radicular específica (SRL, SRSA) para raízes. Valores elevados desses atributos indicam maior superfície implantada por unidade de biomassa investida, refletindo menores custos de construção e, potencialmente, maior eficiência de captura de recursos (Reich et al., 1997; Poorter et al., 2009). Contudo, tais métricas são inerentemente influenciadas pelo tamanho da planta e pelo estágio ontogenético.

Quando a variação em biomassa não é explicitamente considerada, comparações baseadas em atributos podem confundir diferenças reais de eficiência de construção com simples efeitos de escala (Niklas, 2004; Poorter et al., 2015).

Por essa razão, um número crescente de estudos tem enfatizado a importância da análise de relações alométricas e do uso de resíduos de modelos dependentes do tamanho para isolar a variação independente do tamanho na expressão de atributos funcionais (Niklas, 2006; Poorter et al., 2015). Essa abordagem permite identificar indivíduos ou genótipos que constroem mais ou menos superfície de aquisição do que o esperado para um dado investimento em biomassa, fornecendo uma interpretação mais mecanicista de atributos relacionados à eficiência.

Além do investimento em C, a construção das superfícies de aquisição está intimamente ligada ao estado nutricional das plantas. Nutrientes minerais, particularmente nitrogênio (N) e fósforo (P), são componentes essenciais da maquinaria fotossintética, dos sistemas de membranas e da regulação metabólica (Marschner, 2012).

O acúmulo desses nutrientes nas folhas reflete não apenas a disponibilidade no solo, mas também a eficiência de absorção, transporte, alocação interna e, em espécies perenes, de ciclagem interna (Aerts e Chapin, 2000). Embora a eficiência de uso de nutrientes seja frequentemente avaliada com base em teores, abordagens baseadas em conteúdo de nutrientes oferecem uma perspectiva mais integradora, ao considerar explicitamente a produção de biomassa e o acúmulo de nutrientes (Siddiqi e Glass, 1981; Weih et al., 2011).

Os sistemas radiculares acrescentam uma camada adicional de complexidade, uma vez que sua capacidade de suprir água e nutrientes à parte aérea depende não apenas da biomassa total, mas também da morfologia e arquitetura do sistema radicular. Atributos como comprimento total, área de superfície, intensidade de ramificação e distribuição de diâmetros influenciam diretamente a exploração do solo e a interceptação de nutrientes (Ribeiro et al., 2024; Correa et al., 2019). A proliferação de raízes finas, frequentemente expressa pelo número de ápices (tips) e bifurcações (forks), tem sido associada a maior eficiência de aquisição, especialmente para nutrientes de baixa mobilidade no solo, como o P (Silva e Delatorre, 2009; Péret et al., 2014). Ainda assim, relações quantitativas entre atributos da arquitetura das raízes e o acúmulo de nutrientes na parte aérea permanecem pouco exploradas em culturas perenes tropicais (Atkinson et al., 2019; Freschet et al., 2021).

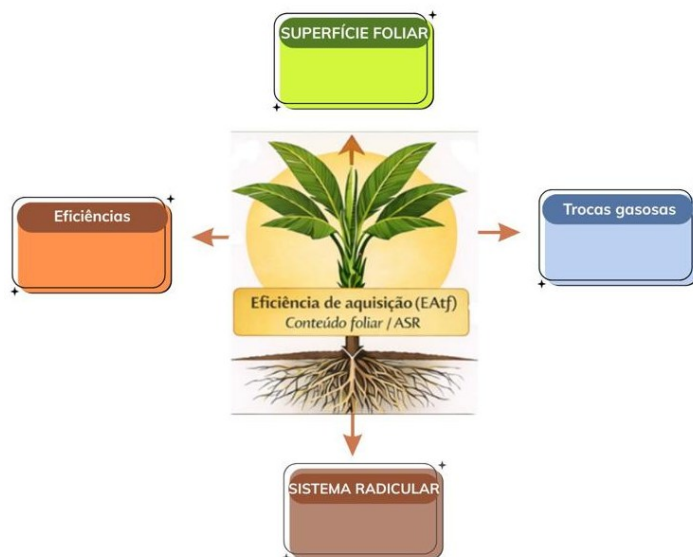
Em espécies perenes, as estratégias de alocação de C e nutrientes são adicionalmente moldadas pela presença de órgãos especializados de armazenamento. Em *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart., palmeira perene nativa das regiões tropicais e subtropicais das Américas, o caule saxofone subterrâneo constitui um compartimento proeminente para o armazenamento de carboidratos, água e nutrientes minerais. Essa estrutura tem sido associada à resiliência frente à seca sazonal e a distúrbios, ao amortecer flutuações de curto prazo na disponibilidade de recursos (E Souza et al., 2017). Contudo, o grau em que o investimento nesse órgão de reserva modula a construção das superfícies de aquisição foliar e radicular, bem como sua interação com o desempenho fisiológico, ainda é pouco quantificado.

A macaúba tem despertado crescente interesse devido ao seu elevado potencial como cultura oleaginosa e à sua ampla adaptabilidade ambiental. Apesar disso, ainda não se tem valores de biomassa, morfologia, fisiologia e nutricionais esperados em mudas com maior potencial a campo.

Neste estudo, avaliamos uma população de mudas de *Acrocomia aculeata*, na fase de viveiro, com os objetivos a seguir, a fim de parametrizar a coordenação que relaciona aquisição e eficiência de uso de recursos, demonstrado na figura 1:

- a) avaliar o acúmulo e a partição de biomassa na parte aérea e nas raízes;
- b) avaliar a morfologia e arquitetura do sistema radicular;
- c) avaliar as eficiências de uso de C para a construção da superfície foliar e radicular;
- d) avaliar, para nutrientes minerais, a eficiência integrada de aquisição e translocação, e a eficiência de utilização para construção da superfície fotossintetizante;
- e) avaliar as trocas gasosas e a eficiência de uso de água;
- f) avaliar o papel do caule saxofone na modulação dos padrões de alocação de biomassa nas superfícies de aquisição de recursos.

Figura 1. Síntese Esquemática de aquisição e eficiência de uso de recursos em mudas de macaúba.



2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material vegetal e condições experimentais

O estudo foi conduzido em casa de vegetação, pertencente à Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. O experimento foi composto por trinta e uma (31) unidades experimentais (UE), onde, cada UE foi composta por uma planta de

macaúba na fase de muda em uma sacola individual de 6 L (20 x 30 cm).

Inicialmente, foram obtidas sementes originadas de populações de macaúba de Minas Gerais, pertencentes ao banco de germoplasma da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Araponga-MG.

As sementes obtidas passaram pelo processo de quebra de dormência desenvolvido por Motoike et al (2007), em laboratório. Quando pré germinadas, as sementes foram transplantadas para tubetes com 0,18 dm³ de volume, contendo substrato comercial, onde permaneceram por 2 meses, quando, então, as pré-mudas foram transplantadas para as sacolas de 6 dm³, contendo substrato composto por terra de subsolo, areia e esterco na proporção (2:1:1) adicionado de fertilizantes (Tabela 1). A partir de um mês após o transplante, foram realizadas fertirrigações, repetidas a cada dois meses (Tabela 1). No sétimo mês, plantas com desenvolvimento satisfatório foram selecionadas para avaliações fisiológicas, morfológicas e nutricionais.

Tabela 1. Componentes do substrato e da fertilização utilizada para o crescimento de mudas do terceiro ao décimo mês.

Material	Quantidade por planta	Quantidade total
<i>Transplante para sacolas</i>		
terra de subsolo	3L	100 L
areia Lavada	1,5 L	50L
esterco	1,5 L	50L
KCl	0,005g	0,100 kg
Superfosfato Simples	0,040 g	0,800 kg
Calcário	0,020g	0,400 kg
<i>Para fertirrigação</i>		
Sulfato de amônio	0,07 g	3,78 g
KCl	0,09 g	4,86 g
Sulfato de Magnésio	0,04 g	2,16 g
Ácido Bórico	0,002 g	0,108 g
Sulfato de Zinco	0,01 g	0,54 g
Sulfato de Cobre	0,01 g	0,54 g

2.2 Avaliações fisiológicas

Para determinação das medidas fisiológicas das folhas foi utilizado o equipamento Analisador de Gás Infravermelho (IRGA) modelo Li-Cor - Li6400 XT, Lincoln, NE, USA, acoplado a fluorímetro portátil de luz de frequência modulado e câmara foliar 2 x 3 cm (Li6400-40) em concentração de CO₂ externo de 400 μmol^{-1} . Com fonte de luz artificial de fluxo de 1000 $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e temperatura da câmara foliar ambiente. As medições foram feitas em uma folha completamente expandida de cada planta e na porção mediana da parte aérea das mudas, no período da manhã, entre 7h e 11 h (Figura 2, A)

Foram determinados as seguintes variáveis: Taxa de fotossíntese Líquida (A), Condutância estomática (g_s), taxa transpiratória (Tr), e obtidos a eficiência no uso da água (WUE, com base em A/Tr) e a eficiência intrínseca no uso da água (WIUE, por meio de A/ g_s).

Os valores de A e g_s foram multiplicados pela área foliar total de cada muda, com ajuste da unidade temporal para hora. Dessa forma, os valores de A e g_s apresentados refletem a magnitude absoluta das trocas gasosas por planta, e não taxas normalizadas por unidade de área foliar, permitindo sua análise ao longo do gradiente de extensão da superfície fotossintetizante.

2.3. Avaliações morfológicas e de biomassa

Para coleta das variáveis morfológicas, as mudas foram abatidas (Figura 2, B), procedimento realizado em um único dia, com temperatura amena. Foi realizada a coleta de todas as folhas de cada muda, imediatamente acondicionadas em sacolas plástica para preservação da forma original, identificadas e mantidas a baixa temperatura para evitar perda de água. No dia seguinte, procedeu-se à mensuração da área foliar (AF) de todas as folhas e folíolos, utilizando o Li-3100C, Licor Biosciences. A leitura de todas as folhas foram realizadas dentro de um saco transparente para evitar a danificação do equipamento pelos espinhos (Figura 2 D).

A seguir, as amostras foram secas em estufas de circulação forçada de ar a 65 °C até obtenção de peso constante, e posteriormente obtida a massa de matéria seca das folhas (mS_Folha) em balança digital com precisão de 0,0001g.

2.4 Morfologia e arquitetura do sistema radicular

As raízes, no momento do abate, foram lavadas em água corrente para remoção do solo aderido, e o excesso de umidade foi retirado com auxílio de papel toalha, em seguida, foi obtida a massa fresca total (mF_Raiz), em uma balança digital de precisão 0,001g. Nesse momento, separou-se as raízes do caule saxofone (Figura 2, C) e uma massa conhecida de raiz de cada planta (aproximadamente 2 g) para posterior análise química, após pesagem.

Para conservação, as raízes foram submersas em sacos contendo solução de álcool 30 %. Posteriormente, em laboratório, as raízes foram digitalizadas utilizando um scanner de mesa (EPSON Expression 11000XL), e analisadas por meio do software WinRHIZO Pro 2013 (Figura 2, E, F), visando obtenção da morfologia (comprimento e volume radicular e área superficial total por classes de diâmetro) e da arquitetura radicular (pontas (*tips*) e bifurcações (*forks*)).

A seguir, as raízes foram levadas à estufa de circulação forçada de ar a uma temperatura de 65 °C até atingir peso constante, para aferição da massa de matéria seca da raiz (mS_Raiz).

Figura 2. A) Medição das variáveis fisiológicas em mudas de macaúba no claro. B) Abate das mudas com separação da parte aérea do sistema radicular . C) Separação das raízes e do caule saxofone. D) Leitura da Área Foliar utilizando o Li-3100C, Licor Biosciences. E) imagens utilizando um scanner EPSON Expression 11000XL. F) imagens das raízes analisadas através do software WinRHIZO Pro 2013.



2.5. Composição mineral e conteúdo de nutrientes

As folhas foram moídas em moinho tipo Wiley e as raízes no moinho bola (Misturador MM 400). A composição mineral foi obtida pelos métodos a seguir: N total pelo método Kjeldahl (Bremner, 1965), K, P, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn e Cu determinados em extratos da mineralização nítrico perclórica. P pelo método de redução do fosfomolibdato pela vitamina C de acordo com Braga e Defelipo (1974). K por fotometria de emissão de chama. Ca, Mg, Fe, Zn, Mn e Cu por espectrofotometria de absorção atômica, S por turbidimetria do sulfato (Blanchar et al., 1965) e B por digestão via seca, seguida da colometria com azometina-H base (Malavolta et al., 1997).

2.6. Partição de biomassa e índices de eficiência

A massa de matéria seca foi determinada separadamente para folhas, bainha (parte aérea não-foliar), caule saxofone e raízes. A partir dessas variáveis, foram avaliados os padrões de partição de biomassa entre os compartimentos da planta, considerando-se tanto as massas absolutas quanto as frações relativas em relação à massa de matéria seca total (MST). Esses indicadores foram utilizados para caracterizar estratégias de alocação estrutural e de reserva, bem como para subsidiar as análises de eficiência de uso de C e de nutrientes e as análises multivariadas subsequentes.

A partir da massa de matéria seca das folhas e dos teores de nutrientes, foram obtidos os conteúdos de nutrientes nas folhas, sendo então calculadas as eficiências de utilização de nutrientes para a produção de biomassa foliar, conforme o índice proposto por Siddiqi e Glass (1981), expresso pela razão entre o quadrado da massa de matéria seca das folhas e o conteúdo do nutriente na folha (Equação 1). Esse índice fornece uma medida individual de eficiência de utilização do nutriente, baseada em conteúdo, e permite comparações diretas entre plantas.

(Equação 1)

$$EU (g^2/mg) = (massa da matéria seca folha)^2 / (conteúdo do nutriente na folha).$$

A eficiência de uso de nutrientes minerais para a produção de superfície fotossintetizante foi avaliada por meio do ajuste de modelos de regressão linear entre a área foliar total e o conteúdo do nutriente na folha. As medidas populacionais da eficiência de uso de C e nutrientes para a formação e área foliar, foi interpretada pela declividade das regressões, expressando a quantidade média de superfície fotossinteticamente ativa formada por unidade de nutrientes acumulado na folha.

A eficiência de uso de C para a produção de superfície fotossintetizante foi estimada individualmente pela área foliar específica (AFE), obtida pela razão entre a área foliar total e a massa de matéria seca das folhas (Equação 2), e, de forma complementar, em nível populacional, pela declividade da relação linear entre essas duas variáveis.

(Equação 2)

$$AFE (m^2/kg) = (área foliar) / (massa matéria seca da folha)$$

A eficiência integrada de aquisição e suprimento nutricional à folha (EATf) foi quantificada individualmente por meio do quociente entre o conteúdo do nutriente na folha e a área superficial total de raízes (ASR; Equação 3a), bem como pela relação entre o conteúdo do nutriente na folha e a massa de matéria seca total de raízes (MSR; Equação 3b).

(Equação 3a)

$$EATf = Cnuti / ASR$$

(Equação 3b)

$$EATf = Cnuti / MSR$$

Adicionalmente, a EATf foi avaliada em nível populacional pela declividade das relações lineares ajustadas entre o conteúdo foliar do nutriente e a área superficial, ou a massa, de raízes.

As eficiências de uso de C para a formação das superfícies radiculares foram avaliadas por meio dos índices de comprimento radicular específico (CRE), área superficial específica (SER) e volume radicular específico (VER), obtidos pelas razões entre, respectivamente, o comprimento total, a área superficial total e o volume total de raízes e a massa de matéria seca total de raízes (Equações 4, 5 e 6).

(Equação 4)

$$CRE \text{ (cm/g)} = (\text{comprimento total raiz}) / (\text{massa seca total da raiz})$$

(Equação 5)

$$SER \text{ (cm}^2\text{/g)} = (\text{área superficial total}) / (\text{massa seca total da raiz})$$

(Equação 6)

$$VER \text{ (cm}^3\text{/g)} = (\text{volume total de raiz}) / (\text{massa seca total da raiz}).$$

2.7. Avaliação do papel do caule saxofone

O papel do caule saxofone como componente de reserva/estrutura foi avaliado a partir de sua massa de matéria seca (MS_Saxo), considerada tanto em termos absolutos quanto relativos (fração MS_Saxo/MST). Para testar a hipótese de modulação dos padrões de alocação entre superfícies de aquisição e reservas, MS_Saxo e MS_Saxo/MST foram relacionadas com (i) a fração de biomassa alocada a folhas e raízes, (ii) a área foliar específica (AFE) e a eficiência de uso de nutrientes para produção de área foliar (AF em função do conteúdo foliar de nutrientes), e (iii) indicadores de economia radicular como CRE, SER e VER e de eficiência integrada de suprimento à folha ($EATf = Cnuti/ASR$ e $Cnuti/MSR$), por meio de análises de correlação e PCA.

2.8. Área foliar (AF) como atributo central

A extensão da superfície fotossintetizante é um atributo central no crescimento inicial de plantas, por estar diretamente associada à interceptação luminosa e à assimilação de C. Essa extensão é representada, neste estudo, pela área foliar total (AF). Diante da relevância funcional esperada da AF, essa variável foi adotada como eixo estruturante inicial das análises, permitindo a organização dos resultados ao longo de um gradiente contínuo. A partir desse gradiente, são apresentadas as relações entre AF, massa de matéria seca, conteúdo de nutrientes, atributos morfológicos do sistema radicular e variáveis fisiológicas de trocas gasosas.

Para fins de apresentação sintética dos resultados, os indivíduos posicionados no extremo superior do gradiente de AF foram agrupados com base no percentil 70 (P70) da distribuição da AF.

2.9. Análises estatísticas

Foram realizadas estatísticas descritivas para entender o comportamento da população estudada diante das variáveis analisadas. Relações entre as variáveis morfológicas, fisiológicas, nutricionais e de biomassa foram avaliadas por meio de análises de regressão linear simples e análises de correlação. Foram utilizadas como medidas populacionais de eficiência de uso de C e de nutrientes as declividades das regressões lineares.

Análises multivariadas por meio de Análise de Componentes Principais (PCA) foram empregadas para integrar os diferentes conjuntos de variáveis e identificar padrões de associação entre os quatro blocos funcionais: partição de biomassa, sistema radicular, nutrição mineral e fisiologia. A PCA foi conduzida de forma hierárquica, inicialmente por meio de análises parciais dentro de blocos funcionais, com o objetivo de reduzir redundâncias e selecionar variáveis representativas de cada bloco. Posteriormente foi realizada uma PCA integradora com as variáveis mais importantes de cada bloco.

3.RESULTADOS

3.1 Variabilidade da população e gradiente funcional associado à área foliar

Na população de mudas de macaúba avaliada ($n = 31$), a AF apresentou elevada variabilidade, com valor médio de $423,5 \text{ cm}^2$, desvio-padrão de $119,1 \text{ cm}^2$ e coeficiente de variação de $28,1 \%$ (Tabela 2).

A distribuição da AF variou de $221,97 \text{ cm}^2$ (P0) a $620,05 \text{ cm}^2$ (P100), com valor mediano de $432,43 \text{ cm}^2$ (P50). A amplitude do intervalo P50–P100 foi superior à do intervalo P0–P50, indicando maior dispersão dos indivíduos na metade superior do gradiente de AF.

Tabela 2. Área Foliar (AF), Área foliar específica (AFE), teores dos nutrientes, massas secas da composição das mudas, variáveis morfológicas da raiz e variáveis fisiológicas

Variável	Unidade	n	Média	Desvio-padrão	P0	P50 (mediana)	P70	P100 (maiorvalor)	Média P<70	Média >=P70
AF	cm ²	31	423.54	119.14	221.97	431.75	502.16	620.05	320.57	549.08
AFE	m ² kg ⁻¹	31	10.58	1.25	7.98	10.47	11.17	13.28	9.64	11.93
N	g kg ⁻¹	31	25.88	2.38	16.94	26.60	27.44	29.48	24.22	27.87
P	g kg ⁻¹	31	0.96	0.15	0.77	0.95	1.01	1.40	0.85	1.12
K	g kg ⁻¹	31	13.57	1.82	9.76	13.21	13.94	19.37	12.28	15.48
Ca	g kg ⁻¹	31	17.96	2.99	13.18	17.64	19.78	24.34	15.64	21.35
Mg	g kg ⁻¹	31	3.23	0.50	2.37	3.20	3.52	4.48	2.84	3.78
S	g kg ⁻¹	31	1.28	0.21	0.86	1.28	1.42	1.72	1.11	1.51
Cu	mg kg ⁻¹	31	4.28	0.73	2.16	4.30	4.56	6.48	3.78	5.01
Mn	mg kg ⁻¹	31	44.32	15.30	27.85	42.79	44.53	116.22	36.17	57.42
Fe	mg kg ⁻¹	31	221.39	90.55	78.47	203.26	253.02	413.09	149.64	328.82
Zn	mg kg ⁻¹	31	15.04	2.56	11.11	14.29	15.93	20.83	12.94	18.11
B	mg kg ⁻¹	31	59.81	13.96	26.22	60.58	63.64	87.45	49.67	75.07
Altura	cm	31	4.45	0.72	3.00	4.50	5.00	6.00	24.90	40.36
nº de folhas	–	31	2.12	0.68	0.83	1.97	2.39	3.80	3.80	5.06
mMS_Folha	g	31	4.06	1.24	1.90	4.28	4.76	6.46	2.97	5.39

mMS_Bainha	g	31	2.12	0.68	0.83	1.97	2.39	3.80	1.59	2.91
mMS_Raíz	g	31	3.06	1.02	1.19	2.99	3.64	5.10	2.20	4.21
mMS_C.Saxofone	g	31	6.23	2.84	1.68	5.22	7.58	11.20	3.76	9.68
mMS_Total	g	31	15.47	5.08	6.60	14.81	17.82	24.84	11.20	21.45
Comprimento_R	cm	31	1165.66	345.81	534.16	1214.87	1343.99	1805.37	890.35	1517.03
ASR_T	cm ²	31	453.79	131.76	186.29	456.40	523.41	736.96	349.02	593.41
Tips	_	31	3120.39	1137.20	1168.00	3442.00	3840.00	4873.00	2143.07	4285.80
Forks	_	31	3853.65	1479.53	1613.00	3883.00	4737.00	6638.00	2565.27	5565.80
REL_(tips/Forks)	_	31	0.83	0.21	0.61	0.77	0.84	1.73	0.71	1.03
AS (0-0.5)	cm ²	31	17.87	6.20	6.31	19.45	21.55	28.02	12.58	24.33
AS (0.5-1)	cm ²	31	92.76	36.13	27.47	91.45	110.15	176.96	63.75	132.69
AS (1-1.5)	cm ²	31	72.98	21.34	26.40	75.80	87.74	107.78	55.07	95.96
AS (1.5-2)	cm ²	31	57.02	12.72	21.17	57.28	64.95	76.26	47.09	70.36
SER_T	cm ² g ⁻¹	31	150.98	19.05	131.03	144.77	155.15	202.57	137.78	172.92
CRE	cm g ⁻¹	31	392.29	89.32	285.76	375.95	397.30	623.05	331.86	492.49
VRE	cm ³ g ⁻¹	31	4.69	0.45	4.03	4.62	4.88	5.67	4.33	5.21
A	umol CO ₂ /h	31	1928.94	634.74	261.33	1953.89	2389.29	2998.98	1396.27	2604.10
gs	mol H ₂ O/h	31	18.89	7.98	2.84	18.96	22.30	33.96	12.31	27.85
TR	mmol/H ₂ O/h	31	374.81	137.55	41.36	395.89	448.17	644.38	272.09	517.05
WUE	μmol CO ₂ mmol ⁻¹ H ₂ O	31	5.484	1.703	3.608	4.822	5.955	10.725	4.20	7.47
WIUE	μmol CO ₂ mol ⁻¹ H ₂ O	31	109.583	32.569	76.283	96.819	116.072	206.696	87.05	147.09

3.2. Composição de biomassa e alocação entre órgãos

Ao longo do gradiente de área foliar, observou-se ampla variação na massa de matéria seca total das mudas e na partição da biomassa entre os diferentes órgãos (Tabela 2; Figura 3). Considerando a massa de matéria seca total incluindo o caule saxofone, os valores variaram de 6,60 a 24,84 g, com média de 15,47 g, evidenciando heterogeneidade na acumulação de biomassa dentro da população avaliada.

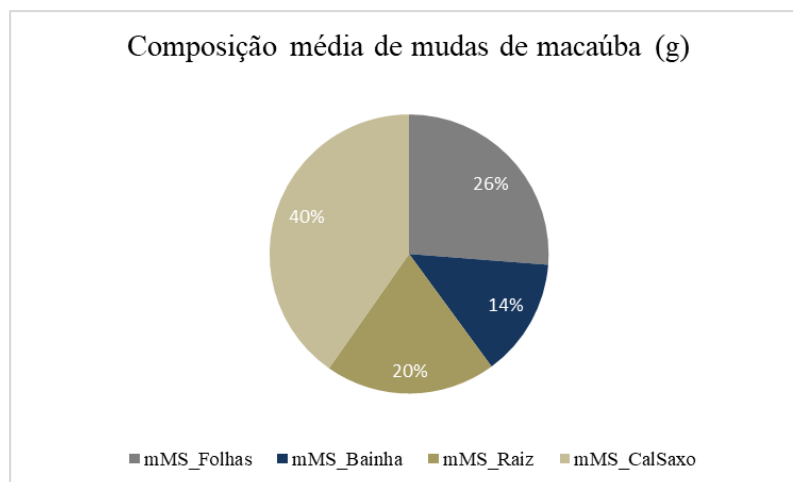
A composição média da biomassa das mudas foi caracterizada por 26,0% de folhas, 14,0% de bainha cotiledonar, 20,0 % de raízes e 40,0 % de caule saxofone (Figura 3). Dessa forma, a fração correspondente à parte aérea (folhas + bainha cotiledonar) representou aproximadamente 40,0 % da massa total, enquanto os órgãos subterrâneos e de reserva (raízes + caule saxofone) corresponderam a 60,0 % da biomassa.

A massa de matéria seca total, tanto com quanto sem o caule saxofone, apresentou associação positiva com a área foliar ao longo do gradiente considerado ($r = 0,88$ e $r = 0,89$; $p < 0,001$, respectivamente), com indivíduos posicionados no extremo superior do gradiente de AF apresentando maiores valores médios de biomassa total. Para fins de apresentação sintética, as mudas com $AF \geq P70$ apresentaram massa de matéria seca total média de $21,45 \pm 3,25$ g, enquanto aquelas com $AF < P70$ apresentaram média de $11,20 \pm 4,25$ g.

A participação relativa dos diferentes órgãos na biomassa total manteve-se relativamente estável ao longo do gradiente de AF, embora diferenças na magnitude absoluta da biomassa tenham sido observadas. O caule saxofone constituiu a principal fração individual da biomassa, representando 40 % da massa total, seguido pelas folhas, raízes e bainha cotiledonar.

A razão entre a massa da parte aérea e a massa do sistema subterrâneo (incluindo o caule saxofone) apresentou valores médios próximos de 0,60, com variação ao longo do gradiente de AF (Figura 3).

Figura 3. Composição média de massas de mudas de macaúba.



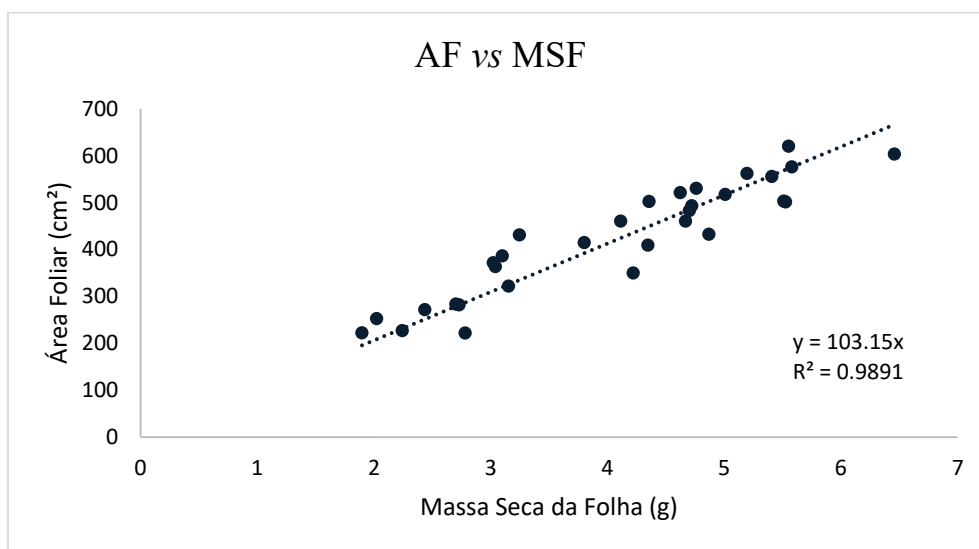
3.3 Área foliar específica

A área foliar específica (AFE), definida como a razão entre a área foliar total e a massa de matéria seca das folhas, apresentou variação considerável entre as mudas avaliadas (Tabela 2). Os valores individuais de AFE variaram de 79,8 a 132,8 cm² g⁻¹, com média de 105,8 cm² g⁻¹, desvio-padrão de 12,5 cm² g⁻¹ e coeficiente de variação de 11,8 %, indicando variação moderada desse atributo na população.

A relação entre a área foliar total e a massa de matéria seca das folhas foi descrita por equação linear com o intercepto forçado à origem (Figura 4). O coeficiente angular estimado foi de 103,1 cm² g⁻¹, valor próximo à média da AFE calculada individualmente, como forma de estimativa desse atributo.

Ao longo do gradiente de área foliar, a AFE apresentou variação relativamente menor quando comparada à variabilidade observada para a AF e para a massa de matéria seca total. Indivíduos posicionados no extremo superior do gradiente de AF apresentaram valores médios de AFE semelhantes aos observados nos demais indivíduos da população (Tabela 2).

Figura 4. Equação linear entre área foliar e massa seca das folhas (intecepto forçado à origem).



3.4. Relações entre área foliar e nutrição mineral

3.4.1 Teores foliares de nutrientes

Os teores foliares de macro e micronutrientes apresentaram variação entre os indivíduos ao longo do gradiente de área foliar (Tabela 2). Considerando os macronutrientes, os valores médios foram de 25,88 g kg⁻¹ para N, 0,96 g kg⁻¹ para P, 13,57 g kg⁻¹ para K, 17,96 g kg⁻¹ para Ca, 3,23 g kg⁻¹ para Mg e 1,28 g kg⁻¹ para S.

Para os micronutrientes, os teores médios foram de 221,39 mg kg⁻¹ para Fe, 59,81 mg kg⁻¹ para B, 44,32 mg kg⁻¹ para Mn, 15,04 mg kg⁻¹ para Zn e 4,28 mg kg⁻¹ para Cu.

Ao longo do gradiente de AF, observaram-se diferenças nos teores médios entre indivíduos posicionados nos extremos do gradiente. As mudas com AF ≥ P70 apresentaram, em média, teores superiores em todos os nutrientes em relação às mudas com AF < P70 (Tabela 2).

3.4.2 Conteúdo de nutrientes nas folhas e relações com a área foliar

Os conteúdos de nutrientes acumulados nas folhas apresentaram associação positiva com a área foliar ao longo do gradiente considerado (Figuras 5 e 6). As regressões lineares

ajustadas entre AF e o conteúdo foliar dos nutrientes apresentaram elevados coeficientes de determinação para os macronutrientes e para a maioria dos micronutrientes.

Os coeficientes angulares das regressões (incremento de AF por unidade de nutriente acumulado nas folhas) diferiram entre os elementos. Para os macronutrientes, os valores estimados foram de 3,18 cm² mg⁻¹ para N, 79,65 cm² mg⁻¹ para P, 5,50 cm² mg⁻¹ para K, 5,10 cm² mg⁻¹ para Ca, 24,07 cm² mg⁻¹ para Mg e 56,12 cm² mg⁻¹ para S (Figura 5).

Entre os micronutrientes, os coeficientes angulares foram de 17,71 cm² µg⁻¹ para Cu, 1,30 cm² µg⁻¹ para Mn, 0,16 cm² µg⁻¹ para Fe, 4,08 cm² µg⁻¹ para Zn e 1,06 cm² µg⁻¹ para B (Figura 6).

Figura 5. Equações lineares entre a área foliar e o conteúdo de Macronutrientes na folha de Macaúba

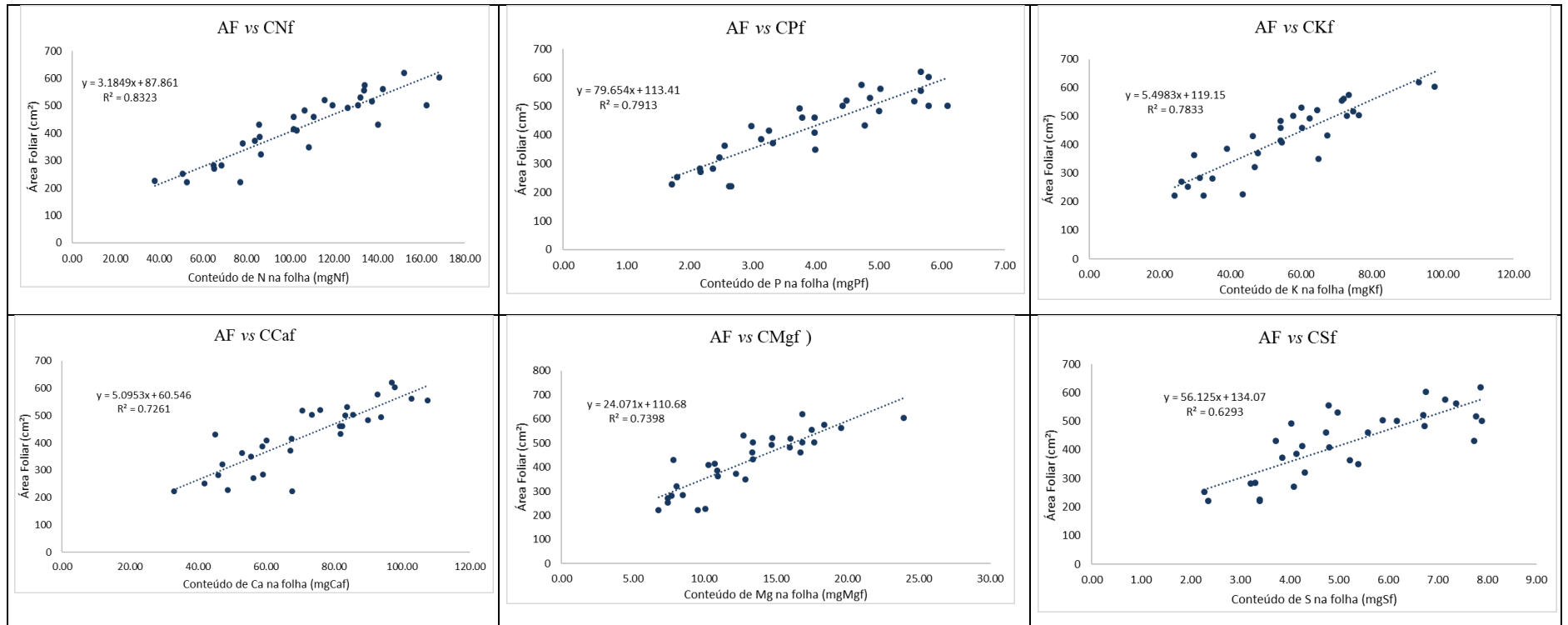
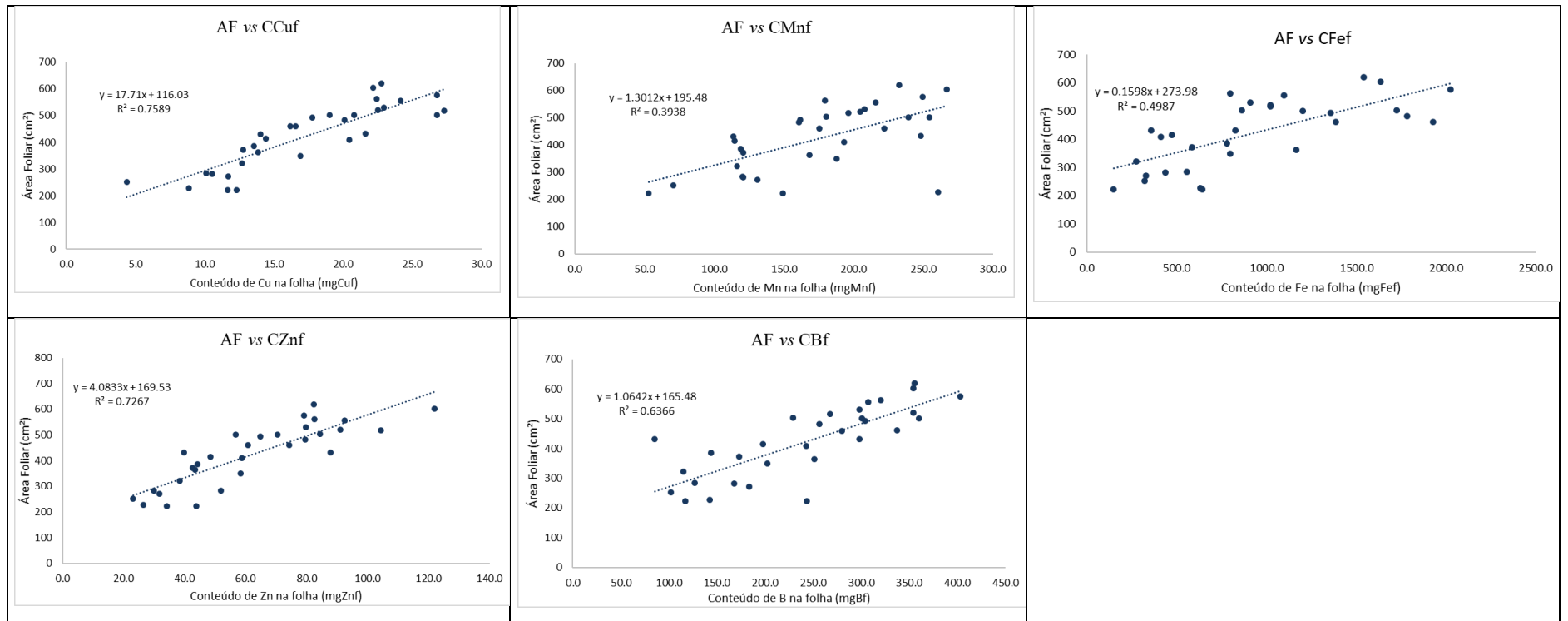


Figura 6. Equações lineares entre a Área Foliar total e o Conteúdo de Micronutrientes por folha



3.4.3 Eficiência de Utilização de Nutrientes Minerais (EU)

Os índices de eficiência de utilização de nutrientes minerais (EU), definidos como a razão entre a massa de matéria seca produzida e o conteúdo acumulado de cada nutriente, apresentaram ampla variação entre os indivíduos avaliados (Tabela 3). Considerando a população total, observou-se valores médios de nutrientes de EU, com maiores valores para P, seguidos por S e Mg, enquanto Ca, Mn, Fe e B apresentaram valores médios inferiores.

Ao longo do gradiente de área foliar, as mudas posicionadas no grupo $AF \geq P70$ apresentaram, valores médios mais elevados de EU para todos os nutrientes avaliados, em comparação às mudas com $AF < P70$ (Tabela 3). As diferenças foram mais pronunciadas para os macronutrientes (P, S, Mg, K e Ca, já para os micronutrientes as diferenças entre os grupos foram de menor magnitude.

Os valores extremos observados na população evidenciam elevada variabilidade intraespecífica nos índices de EU, com amplitudes expressivas entre os valores mínimos (P0) e máximos (P100) para todos os nutrientes (Tabela 3).

Tabela 3. Descrição das Eficiências de Utilização de nutrientes minerais para a produção de biomassa foliar, em mudas de macaúba, na fase de viveiro.

Variáveis	Unidade	n	Média	Desvio-padrão	P0 (menorvalor)	Média AF>=P70	Média AF < P70	P100 (maiorvalor)
EUN	g ² mg ⁻¹	31	0,157	0,048	0,068	0,197	0,138	0,233
EUP	g ² mg ⁻¹	31	4,308	1,391	1,352	5,365	3,804	6,863
EUK	g ² mg ⁻¹	31	0,301	0,089	0,116	0,374	0,267	0,424
EUCa	g ² mg ⁻¹	31	0,237	0,093	0,098	0,316	0,200	0,413
EUMg	g ² mg ⁻¹	31	1,295	0,452	0,501	1,651	1,125	2,268
EUS	g ² mg ⁻¹	31	3,288	1,288	1,453	4,343	2,786	6,112
EUCu	g ² mg ⁻¹	31	0,972	0,325	0,293	1,217	0,855	1,595
EUMn	g ² mg ⁻¹	31	0,099	0,037	0,019	0,129	0,084	0,169
EUFe	g ² mg ⁻¹	31	0,021	0,009	0,008	0,023	0,020	0,046
EUZ	g ² mg ⁻¹	31	0,271	0,076	0,106	0,321	0,248	0,433
EUB	g ² mg ⁻¹	31	0,072	0,027	0,031	0,088	0,064	0,133

3.4.4 Eficiência integrada de aquisição e suprimento nutricional à folha (EATf)

As regressões lineares entre o conteúdo foliar dos macronutrientes e a ASR apresentaram associações positivas e estatisticamente significativas para todos os nutrientes avaliados (Tabela 4). Os coeficientes de correlação (r) indicaram relação estreita entre o incremento da superfície radicular e o aumento do conteúdo foliar de nutrientes, com valores elevados especialmente para macronutrientes, evidenciando consistência na resposta ao longo da população avaliada. Padrão semelhante foi observado para os micronutrientes, cujas equações também apresentaram associações positivas significativas, ainda que com maior dispersão entre indivíduos (Tabela 4).

Quando o conteúdo foliar de nutrientes foi relacionado à massa de matéria seca de raízes (MSR), observou-se comportamento análogo (Tabela 5). As equações ajustadas indicaram aumento do conteúdo foliar de macro e micronutrientes com o incremento da MSR, com coeficientes de correlação comparáveis aos observados para a ASR. Para vários nutrientes, os valores de r obtidos nas regressões com MSR foram semelhantes ou ligeiramente superiores aos obtidos com ASR, indicando que tanto a dimensão superficial quanto a massa do sistema radicular estiveram associadas ao suprimento nutricional à folha.

Ainda, observou-se que indivíduos posicionados no extremo superior do gradiente de AF apresentaram, em geral, maiores conteúdos foliares de nutrientes por unidade de superfície e de massa radicular.

As razões entre o conteúdo foliar dos macronutrientes e a ASR indicaram incremento na quantidade de nutriente acumulado nas folhas por unidade de superfície radicular nos indivíduos com $AF \geq P70$, em comparação àqueles com $AF < P70$. Padrão semelhante foi observado quando o conteúdo foliar foi normalizado pela MSR.

Tabela 4. Equações entre o Conteúdo de nutrientes na folha (macronutrientes, em mg; micronutrientes, em µg) e a Área superficial total de raízes (cm²), em mudas de macaúba, na fase de viveiro.

Nutriente	Equação linear	r	p
N	$Y = 0,2229 \cdot ASR + 4,239$	0,861	$5,34e^{-10}$
P	$Y = 0,006774 \cdot ASR + 0,8197$	0,671	$3,63e^{-05}$
K	$Y = 0,1172 \cdot ASR + 2,174$	0,805	$4,68e^{-08}$
Ca	$Y = 0,1129 \cdot ASR + 20,02$	0,746	$1,43e^{-06}$
Mg	$Y = 0,02384 \cdot ASR + 2,18$	0,738	$2,18e^{-06}$
S	$Y = 0,00888 \cdot ASR + 1,128$	0,695	$1,44e^{-05}$
Cu	$Y = 0,02874 \cdot ASR + 4,323$	0,646	$8,63e^{-05}$
Mn	$Y = 0,2287 \cdot ASR + 71,46$	0,525	$2,45e^{-03}$
Fe	$Y = 2,59 \cdot ASR - 239$	0,648	$8,13e^{-05}$
Zn	$Y = 0,1448 \cdot ASR - 3,523$	0,767	$4,75e^{-07}$
B	$Y = 0,4615 \cdot ASR + 33,07$	0,681	$2,50e^{-05}$

Para os micronutrientes, embora a variabilidade entre indivíduos tenha sido maior, observou-se tendência de maiores valores médios das razões conteúdo foliar/ASR e conteúdo foliar/MSR nos indivíduos posicionados no extremo superior do gradiente de AF, refletindo maior acúmulo absoluto de nutrientes nas folhas em relação à dimensão do sistema radicular.

Em conjunto, esses resultados mostram que, ao longo do gradiente de área foliar, ocorreram variações na eficiência integrada de aquisição e suprimento nutricional à folha, expressas pela relação entre o conteúdo foliar de nutrientes e os atributos estruturais do sistema radicular.

Tabela 5. Equações entre o Conteúdo de nutrientes na folha (macronutrientes, em mg; micronutrientes, em µg) e a Massa de matéria seca de raízes (em g), em mudas de macaúba, na fase de viveiro.

Nutriente	Equação linear	r	p
N	$Y = 28,69 \cdot MSR + 17,56$	0,860	$5,53e^{-10}$
P	$Y = 0,8893 \cdot MSR + 1,171$	0,684	$2,21e^{-05}$
K	$Y = 15,8 \cdot MSR + 6,981$	0,843	$2,61e^{-09}$
Ca	$Y = 14,96 \cdot MSR + 25,44$	0,768	$4,48e^{-07}$
Mg	$Y = 3,272 \cdot MSR + 2,979$	0,787	$1,55e^{-07}$
S	$Y = 1,131 \cdot MSR + 1,694$	0,688	$1,93e^{-05}$
Cu	$Y = 3,714 \cdot MSR + 5,991$	0,649	$7,93e^{-05}$
Mn	$Y = 29,81 \cdot MSR + 83,99$	0,531	$2,12e^{-03}$
Fe	$Y = 366,9 \cdot MSR - 187,2$	0,713	$6,76e^{-06}$
Zn	$Y = 18,66 \cdot MSR + 5,062$	0,768	$4,59e^{-07}$
B	$Y = 60,83 \cdot MSR + 56,26$	0,697	$1,32e^{-05}$

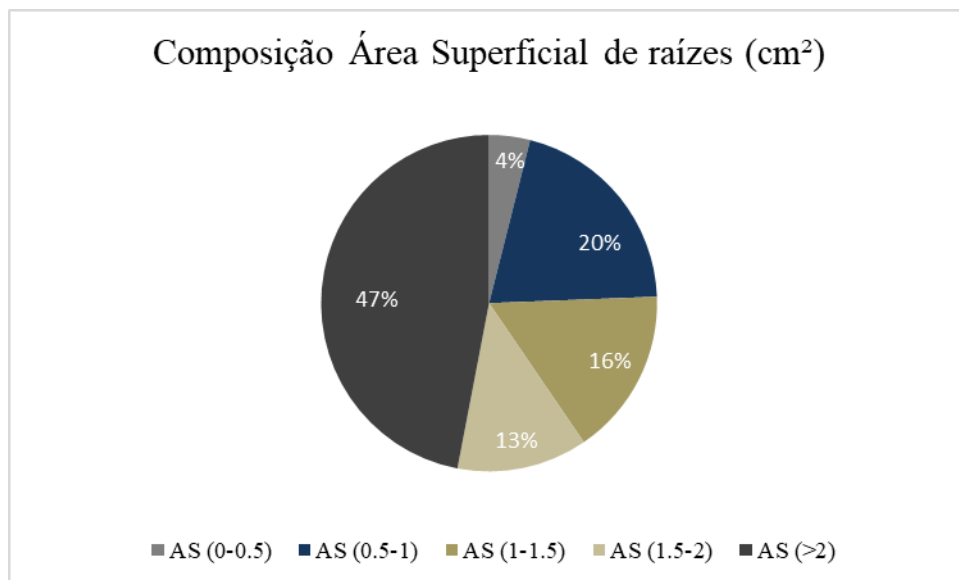
3.5 Morfologia e arquitetura do sistema radicular ao longo do gradiente de área foliar

A morfologia do sistema radicular das mudas de macaúba apresentou variação entre os indivíduos ao longo do gradiente de área foliar (Tabela 2). A área superficial total de raízes (ASR_T) variou de 186,29 a 736,96 cm², com média de 453,79 cm², evidenciando heterogeneidade na dimensão da superfície radicular dentro da população avaliada.

Ao longo do gradiente de AF, a ASR apresentou associação positiva com a área foliar ($r = 0,77$; $p < 0,001$), com indivíduos posicionados no extremo superior do gradiente apresentando maiores valores absolutos de superfície radicular (Tabela 2).

A composição da ASR por classes de diâmetro revelou predominância de raízes finas ao longo de toda a população (Figura 7). Considerando-se a soma das classes com diâmetro inferior a 2 mm, aproximadamente 53 % da ASR total correspondeu a raízes finas, enquanto as classes com diâmetro superior a 2 mm representaram cerca de 47 % da superfície radicular total, proporção semelhante entre os diferentes segmentos do gradiente de AF.

Figura 7. Área Superficial de Raízes por classe de diâmetro.



Além da dimensão da superfície radicular, descritores da arquitetura do sistema radicular, expressos pelo número de ápices radiculares (tips) e de ramificações (forks), também apresentaram variação entre os indivíduos (Tabela 6). As mudas posicionadas no grupo $AF \geq$

P70 apresentaram valores médios mais elevados de tips (3822 ± 868) e forks (4890 ± 1228) em comparação às mudas com $AF < P70$ (2786 ± 1112 e 3360 ± 1346 , respectivamente).

Tabela 6. Descritores de arquitetura do sistema radicular de mudas de macaúba, estratificados pelo gradiente de área foliar (AF).

Grupo AF	n	Tips (média \pm DP)	Forks (média \pm DP)	Forks/Tips (média \pm DP)
AF < P70	21	2143 \pm 1112	2565 \pm 1346	1,20 \pm 0,24
AF \geq P70	10	4285 \pm 868	5565 \pm 1228	1,30 \pm 0,15

A razão entre forks e tips apresentou valores médios semelhantes entre os grupos (1,20 \pm 0,24 para $AF < P70$ e 1,30 \pm 0,15 para $AF \geq P70$), indicando que o aumento no número absoluto de ramificações esteve associado principalmente à maior escala do sistema radicular, mantendo-se proporções arquiteturais comparáveis ao longo do gradiente de área foliar.

3.6 Variáveis fisiológicas ao longo do gradiente de área foliar

As variáveis fisiológicas de trocas gasosas apresentaram variação entre os indivíduos ao longo do gradiente de área foliar (Tabela 2; Figuras 8 e 9).

A fotossíntese líquida integrada apresentou ampla variação na população, com valores médios de 2604,10 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ h}^{-1}$ para indivíduos posicionados no extremo superior do gradiente de AF e 1396,27 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ h}^{-1}$ para aqueles posicionados no segmento inferior (Tabela 2).

A fotossíntese líquida integrada apresentou associação positiva com a área foliar ao longo do gradiente considerado, refletindo maiores valores absolutos de assimilação em indivíduos com maior superfície foliar desenvolvida (Figura 8).

A condutância estomática integrada à área foliar apresentou padrão semelhante, com médias de 27,85 $\text{mol H}_2\text{O h}^{-1}$ nos indivíduos com maior AF e 12,31 $\text{mol H}_2\text{O h}^{-1}$ nos indivíduos com menor AF (Tabela 2). Assim também, a taxa de transpiração (Tr) apresentou maiores valores médios nos indivíduos posicionados no extremo superior do gradiente (517,05 $\text{mmol H}_2\text{O h}^{-1}$) em comparação aos demais (272,09 $\text{mmol H}_2\text{O h}^{-1}$).

A fotossíntese líquida integrada apresentou associação positiva com a área foliar ($r = 0,80$; $p < 0,001$, Figura 7) ao longo do gradiente de AF considerado e com a condutância estomática ($r = 0,82$, $p < 0,001$, Figura 8).

Figura 8. Relação entre Fotossíntese Líquida Integrada e Área foliar em mudas de macaúba, na fase de viveiro.

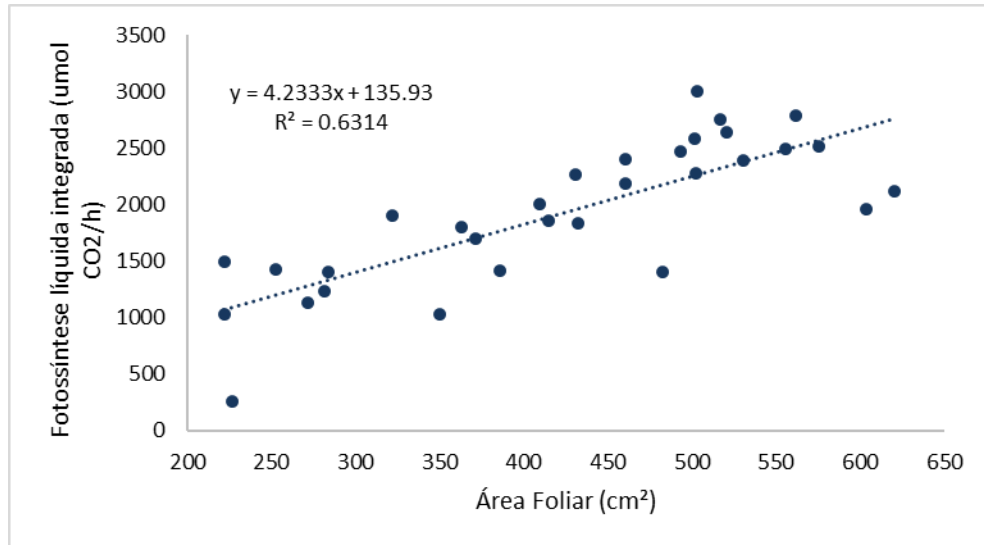
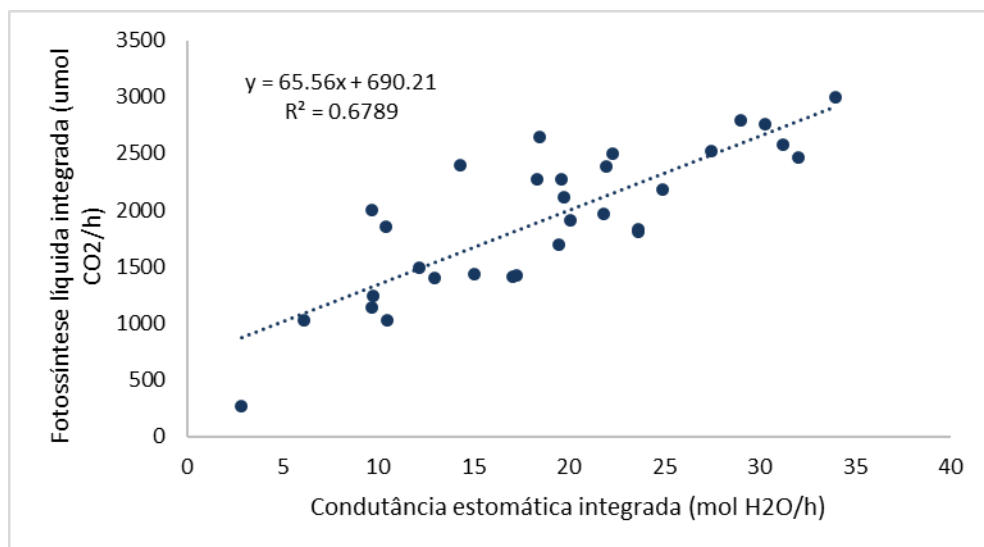


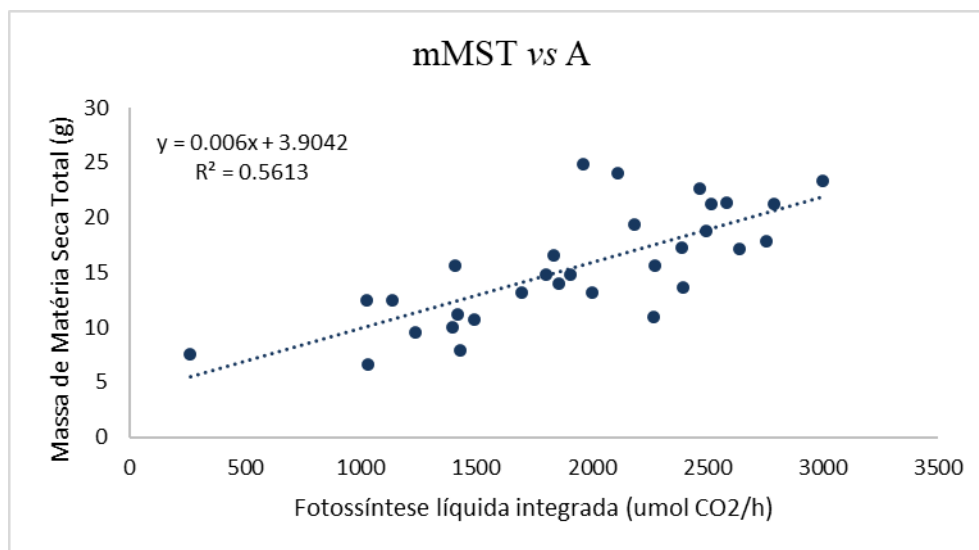
Figura 9. Relação entre Fotossíntese Líquida e condutância estomática em mudas de macaúba, na fase de viveiro.



A eficiência do uso da água (WUA) apresentou valores médios de $7,47 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ nos indivíduos com maior AF e $4,20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ nos indivíduos com menor AF. Em contraste, a eficiência intrínseca do uso da água (iWUE) apresentou valores médios de $147,09 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ no extremo superior do gradiente de AF e $87,05 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ no segmento inferior (Tabela 2).

Além das relações entre área foliar, fotossíntese e condutância estomática, observou-se associação positiva entre a fotossíntese líquida integrada à área foliar e a massa de matéria seca total da planta (Figura 9). O ajuste linear indicou aumento da biomassa total com o incremento da fotossíntese integrada, conforme descrito pela equação $m\text{MST} = 0,006 \cdot A + 3,90$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,56$.

Figura 10. Equação linear entre a Massa de matéria seca total e a fotossíntese líquida integrada em mudas de macaúba, na fase de viveiro.



3.7 Análise multivariada das relações entre porte, estrutura radicular, nutrição e fisiologia (PCA)

A análise de componentes principais (PCA) foi conduzida de forma hierárquica, inicialmente por meio de análises parciais dentro de blocos funcionais (Tabela 7), com o objetivo de reduzir redundâncias e selecionar variáveis representativas de cada domínio. Foram considerados quatro blocos funcionais: biomassa, sistema radicular, nutrição mineral e

fisiologia. As variáveis incluídas em cada bloco, os critérios de seleção e as variáveis escolhidas para compor a PCA integradora final constam da Tabela 7.

No bloco de biomassa, a PCA evidenciou um gradiente dominante associado à escala de crescimento das mudas, no qual a área foliar total apresentou a maior carga absoluta no primeiro componente principal, sendo selecionada como variável representativa desse domínio. No bloco do sistema radicular, o primeiro componente principal esteve associado à dimensão do sistema radicular, enquanto um componente secundário capturou variações relacionadas à arquitetura, representada pela razão entre o número de ápices radiculares e o número de ramificações (tips/forks). No bloco nutricional, a PCA dos conteúdos foliares indicou forte covariação entre os nutrientes, com os conteúdos de fósforo (P) e potássio (K) apresentando cargas elevadas e sendo selecionados como variáveis representativas. No bloco fisiológico, a PCA distinguiu um eixo associado à magnitude dos fluxos de carbono e água, representado pela fotossíntese líquida integrada, e um eixo secundário relacionado à eficiência intrínseca do uso da água (iWUE).

Tabela 7. Blocos funcionais, variáveis submetidas às PCA parciais e selecionadas para a PCA final

Bloco funcional	Variáveis incluídas na PCA parcial	Critério de seleção (PCA parcial)	Variáveis selecionadas para a PCA final
Porte e biomassa	AF total; MSFolhas; MSBainha; MSPA; MSCalSaxo; MSTcomCalSaxo	Maior carga absoluta em CP1 do bloco (gradiente de porte)	AF total
Sistema radicular	ASR; MSR; tips; tips/forks	CP1 representando escala do sistema radicular; CP2 associado à arquitetura	ASR; tips/forks
Nutrição mineral (conteúdos foliares)	C_Nf; C_Pf; C_Kf; C_Caf; C_Mgf; C_Sf; C_Fef; C_Znf; C_Mnf; C_Bf; C_Cuf	Maiores cargas absolutas em CP1 (escala nutricional)	C_Pf; C_Kf
Fisiologia	A integrada; gs integrada; Tr; EUA; iWUE	CP1 associado à magnitude dos fluxos; CP2 associado à eficiência hídrica	A integrada; iWUE

Com base nas análises por blocos, foi realizada uma PCA integradora final utilizando as seguintes variáveis: área foliar total, área superficial total de raízes, razão tips/forks, conteúdos foliares de P e K, fotossíntese líquida integrada e eficiência intrínseca do uso da água. Os coeficientes de carga (loadings), os autovalores e a variância explicada dos componentes principais retidos estão apresentados na Tabela 8.

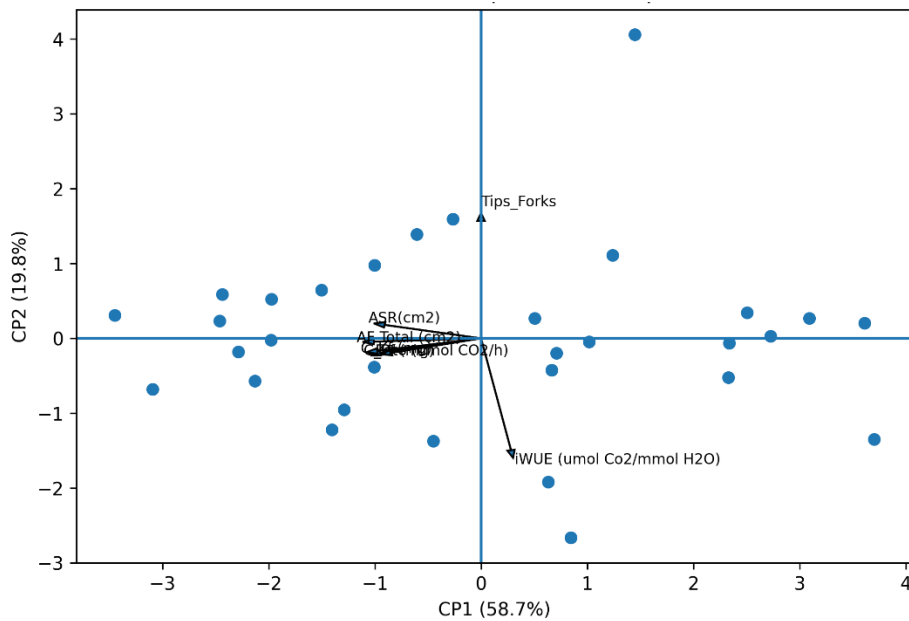
De acordo com o critério de Kaiser (1960), foram retidos para interpretação apenas os dois primeiros componentes principais, cujos autovalores foram superiores a 1. O primeiro componente principal (CP1) explicou a maior proporção da variância total do conjunto de dados e apresentou cargas elevadas e de mesmo sinal para a área foliar total, a área superficial radicular, os conteúdos foliares de P e K e a fotossíntese líquida integrada, evidenciando variação coordenada desses atributos ao longo de um gradiente multivariado comum. O segundo componente principal (CP2) esteve associado principalmente à variação na arquitetura do sistema radicular, expressa pela razão tips/forks, e à eficiência intrínseca do uso da água, distinguindo os indivíduos quanto a esses atributos funcionais.

Tabela 8. Coeficientes de carga (loadings), autovalores e variância explicada dos componentes principais retidos na PCA final (CP1 e CP2)

Variável	CP1	CP2
Área foliar total (AF)	-0,9620	-0,0239
Área superficial de raízes (ASR)	-0,8712	0,1004
tips/forks	-0,0004	0,8393
Conteúdo foliar de P (C_Pf)	-0,9074	-0,1074
Conteúdo foliar de K (C_Kf)	-0,9323	-0,0936
Fotossíntese líquida integrada (A)	-0,8158	-0,1075
Eficiência intrínseca do uso da água (iWUE)	0,2597	-0,7998
Autovalor	4,110	1,387
Variância explicada (%)	58,7	19,8
Variância explicada acumulada (%)	58,7	78,5

A projeção dos indivíduos no plano definido por CP1 e CP2 evidenciou a organização da população ao longo desses dois eixos principais (Figura 11), refletindo diferenças integradas de porte, estrutura radicular, nutrição mineral e desempenho fisiológico entre as mudas avaliadas.

Figura 11. Dispersão das variáveis e das plantas de macaúba nos componentes principais (CP1 e CP2) do modelo multivariado.

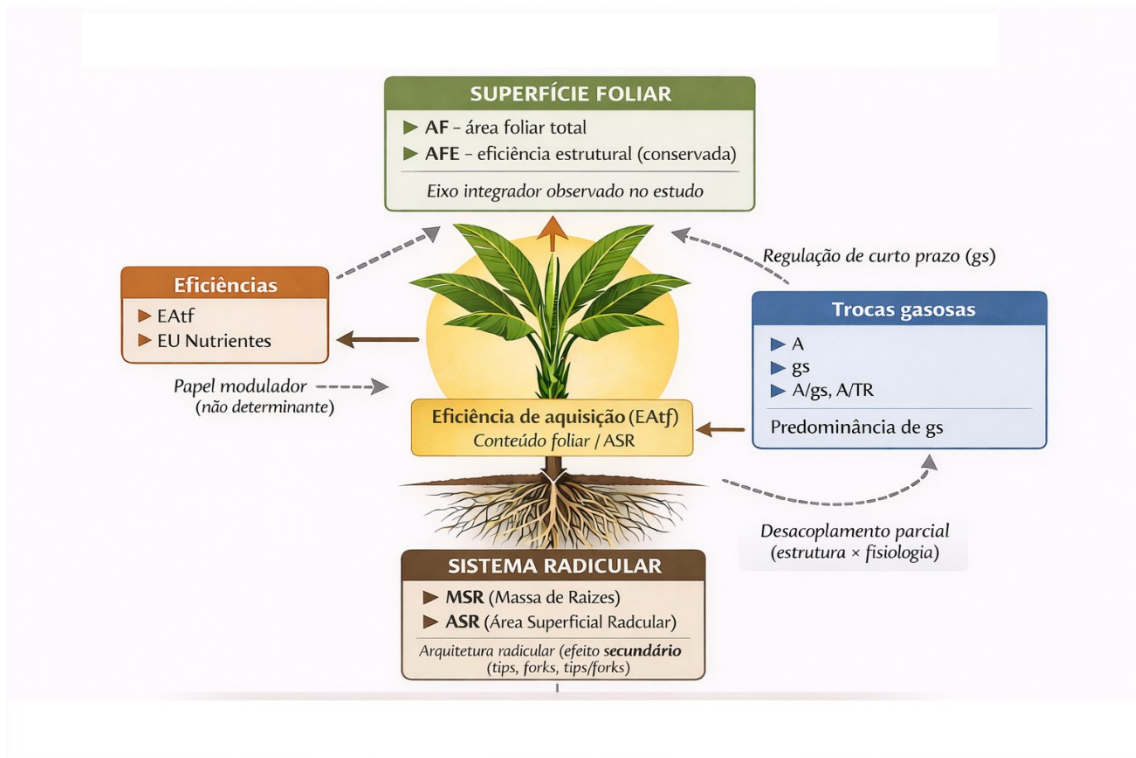


4. DISCUSSÃO

4.1 Porte da planta como eixo integrador das superfícies de aquisição

Os resultados deste estudo demonstram que a variação intraespecífica observada em mudas de *Acrocomia aculeata* organizou-se predominantemente ao longo de um gradiente de porte da planta, expresso pela área foliar. A extensão da superfície fotossintetizante (AF) mostrou-se fortemente associada a alterações coordenadas na escala estrutural, nutricional e fisiológica, confirmando o papel central do tamanho da planta na integração entre aquisição de C, absorção de nutrientes e desempenho fisiológico (Figura 12).

Figura 12. Parâmetros que relacionam aquisição e eficiência de uso de recursos em mudas de macaúba.



A associação positiva entre área foliar, biomassa total, conteúdos foliares de nutrientes e fluxos absolutos de trocas gasosas indica que indivíduos de maior porte apresentaram maior capacidade integrada de aquisição e utilização de recursos. Esse padrão é consistente com a teoria das superfícies de aquisição, segundo a qual o crescimento das plantas depende da construção e manutenção de interfaces especializadas para a captura de luz, CO₂, água e nutrientes minerais, processos que impõem custos significativos em C e nutrientes (Chapin et al., 1990; Poorter et al., 2009).

Entretanto, como destacado por Niklas (2004, 2006) e Poorter et al. (2015), relações positivas entre atributos funcionais e desempenho podem emergir simplesmente como consequência de efeitos de escala, uma vez que plantas maiores tendem, inevitavelmente, a apresentar maiores valores absolutos de área foliar, biomassa, conteúdos de nutrientes e fluxos fisiológicos. Nesse contexto, a organização dos resultados ao longo de um gradiente contínuo de área foliar, aliada ao uso de métricas baseadas em conteúdo, declividades de equações em nível da população de plantas estudada e análises multivariadas, permitiu distinguir padrões associados ao aumento do porte daqueles relacionados a variações funcionais mais específicas.

A análise de componentes principais (PCA) reforçou essa interpretação ao evidenciar um primeiro eixo multivariado fortemente associado à área foliar, à área superficial radicular, aos conteúdos foliares de nutrientes e à fotossíntese integrada, caracterizando um gradiente comum de escala funcional. Esse resultado indica que, na população avaliada, o aumento do porte esteve acompanhado por um crescimento coordenado das superfícies de aquisição acima e abaixo do solo, bem como da magnitude dos fluxos fisiológicos, em consonância com observações em outras espécies perenes e herbáceas (Poorter et al., 2012; Reich, 2014).

Ao mesmo tempo, a presença de eixos secundários associados à arquitetura radicular e à eficiência intrínseca do uso da água sugere que, mesmo sob um forte controle do porte, existe variação funcional adicional entre indivíduos, relacionada à forma como os recursos são adquiridos e utilizados. Esses resultados dão suporte parcial à hipótese de que a eficiência do investimento em superfícies de aquisição não é explicada exclusivamente pelo tamanho da planta, abrindo espaço para discutir, nas seções subsequentes, o papel da nutrição mineral, da arquitetura radicular e da regulação fisiológica na modulação desses padrões.

4.2 Eficiência do investimento em carbono na superfície fotossintetizante

A eficiência do investimento em carbono na superfície fotossintetizante foi avaliada, neste estudo, a partir da área foliar específica (AFE) e de sua relação com a expansão da área foliar total ao longo do gradiente de porte das mudas de macaúba. A AFE apresentou variabilidade moderada na população avaliada e valores médios semelhantes entre indivíduos posicionados nos diferentes segmentos do gradiente de área foliar, indicando que o aumento da área foliar esteve predominantemente associado ao incremento da massa de matéria seca das folhas, e não a alterações expressivas na razão área/massa.

Esse padrão sugere que para as mudas, na fase de viveiro, a expansão da superfície fotossintetizante ocorreu principalmente por aumento da escala estrutural do compartimento foliar, mantendo-se relativamente constante a densidade estrutural das folhas (AFE). Resultados semelhantes têm sido observados em diferentes espécies lenhosas e perenes, nas quais a AFE apresenta menor plasticidade em comparação a atributos diretamente relacionados ao tamanho da planta, especialmente quando o crescimento ocorre sob condições ambientais relativamente homogêneas (Poorter et al., 2009; Poorter et al., 2015).

Do ponto de vista conceitual, a AFE é frequentemente interpretada como um indicador da eficiência de investimento de C na construção da superfície fotossintetizante, refletindo compromissos entre captura de luz, resistência mecânica e longevidade foliar (Reich et al., 1997; Wright et al., 2004). No entanto, como destacado por Niklas (2004) e Poorter et al. (2012), diferenças em atributos expressos em base de área ou de massa nem sempre se traduzem em diferenças funcionais quando analisadas em conjunto com o porte da planta. Nesse contexto, a constância relativa da AFE observada neste estudo indica que variações na capacidade fotossintética potencial entre indivíduos estiveram fortemente condicionadas pelo tamanho absoluto do aparato foliar, e não por alterações na eficiência estrutural das folhas.

Esse padrão é coerente com os efeitos de escala associados ao aumento do porte da planta, conforme discutido no item 4.1, nos quais a expansão do aparato de aquisição de C precede ajustes finos na eficiência fisiológica ou estrutural (Niklas, 2006; Reich, 2014).

Além disso, a análise multivariada corroborou a centralidade do porte como eixo organizador das variações observadas, ao posicionar a área foliar total como variável de maior carga no primeiro componente, com grande carga também a na área de superfície radicular. Esse resultado indica que, embora a AFE seja um atributo relevante para comparações interespecíficas ou ao longo de gradientes ambientais amplos, sua capacidade de explicar diferenças intraespecíficas de desempenho pode ser limitada quando a variação no tamanho da planta é dominante.

Os resultados sugerem que, nas mudas de macaúba avaliadas, a eficiência do investimento em C na superfície fotossintetizante foi relativamente conservada entre os indivíduos, enquanto as diferenças de crescimento e desempenho fisiológico foram coerentes com a expansão do porte da planta, conforme já discutido. Essa evidência é coerente com estudos que indicam que ajustes na AFE tendem a ocorrer de forma mais pronunciada em resposta a gradientes de luz, disponibilidade hídrica ou estresses ambientais, enquanto, em condições controladas, o crescimento inicial é governado principalmente pelo aumento coordenado das superfícies de aquisição (Poorter et al., 2012; Freschet et al., 2015).

Esses resultados dão suporte à hipótese de que, na fase inicial de crescimento, a eficiência estrutural do investimento em C na superfície fotossintetizante é relativamente conservada, sendo o crescimento predominantemente governado pela expansão do porte da planta.

4.3 Arquitetura do sistema radicular e eficiência integrada de suprimento nutricional à folha (EATf)

A eficiência integrada de suprimento nutricional à folha (EATf) depende não apenas da quantidade de biomassa radicular investida, mas também da arquitetura do sistema radicular e da extensão efetiva da superfície de absorção. Neste estudo, a associação positiva entre os conteúdos foliares de nutrientes e a área superficial total de raízes (ASR), bem como com a massa seca de raízes (MSR), indica que o suprimento nutricional à parte aérea foi fortemente condicionado pela escala e pela organização do sistema radicular ao longo do gradiente de porte das mudas de macaúba.

A predominância de raízes finas na composição da ASR total, aliada ao aumento coordenado de ASR e MSR em indivíduos de maior área foliar, sugere que a expansão do sistema radicular ocorreu de forma funcionalmente coerente com o crescimento da parte aérea. Raízes finas desempenham papel central na absorção de nutrientes pouco móveis no solo, como fósforo, e sua grande contribuição para a superfície da interface raiz-solo é amplamente reconhecida (Lynch, 1995; Fitter et al., 2002; Lambers et al., 2006). Assim, a maior ASR observada nos indivíduos de maior porte representa um aumento efetivo da interface de absorção, compatível com os maiores conteúdos foliares de nutrientes observados.

Além da dimensão da superfície radicular, sua arquitetura expressa pelo número de ápices radiculares (tips), ramificações (forks) e pela razão tips/forks forneceram evidências sobre a organização funcional do sistema radicular. Embora o número absoluto de tips e forks tenha sido maior em indivíduos posicionados no extremo superior do gradiente de área foliar, a manutenção de valores semelhantes da razão tips/forks entre os grupos indica que o aumento da ramificação ocorreu de forma proporcional à expansão do sistema radicular como um todo, caracterizando arquitetura conservada, na qual sistemas radiculares maiores mantêm relações internas semelhantes às de sistemas menores, ao invés de grandes ajustes na arquitetura (Fitter, 1987; Pagès et al., 2004). Nessas condições, as diferenças no suprimento nutricional à parte aérea refletiram predominantemente a ampliação da massa e da extensão da superfície do sistema radicular, e não mudanças qualitativas acentuadas na sua arquitetura.

As relações lineares observadas entre os conteúdos foliares de nutrientes e a ASR, bem como entre os conteúdos foliares e a MSR, reforçam a utilidade da EATf como métrica integradora do suprimento nutricional. Ao considerar o conteúdo foliar do nutriente em relação às superfícies e massas radiculares responsáveis pela absorção, a EATf permite avaliar a eficiência funcional do sistema radicular em sustentar a nutrição da parte aérea, superando limitações de abordagens baseadas exclusivamente em teores foliares ou em atributos isolados do sistema radicular (Siddiqi & Glass, 1981; Lambers et al., 2008).

Nesse contexto, a associação entre conteúdo foliar de P e ASR observada neste estudo é particularmente relevante. O P é um nutriente de baixa mobilidade no solo, cuja aquisição depende fortemente da exploração espacial promovida pelas raízes finas e por uma arquitetura radicular eficiente (Lynch, 2011; Lynch & Brown, 2012). A resposta positiva do conteúdo foliar de P ao aumento da ASR e da MSR sugere que, mesmo em condições controladas de viveiro, diferenças na escala do sistema radicular, expressas pela massa e pela área superficial, mantida uma arquitetura relativamente conservada, podem se traduzir em variações substanciais no suprimento desse nutriente à parte aérea.

A manutenção de sistemas radiculares com arquiteturas semelhantes entre indivíduos de diferentes portes indica que, na população avaliada, a EATf foi modulada predominantemente pela escala do sistema radicular, como já discutido, e não por mudanças qualitativas acentuadas na sua arquitetura. Esse resultado condiz com observações de que ajustes arquiteturais mais marcantes tendem a ocorrer em resposta a gradientes ambientais fortes ou a limitações nutricionais severas, enquanto, em condições relativamente homogêneas, o crescimento inicial é governado principalmente pela expansão coordenada das superfícies de aquisição (Hodge et al., 2009; Freschet et al., 2021).

Os resultados indicam que a eficiência integrada de suprimento nutricional à folha em mudas de macaúba foi sustentada por sistemas radiculares progressivamente maiores, com arquitetura proporcionalmente conservada, capazes de fornecer os nutrientes necessários para acompanhar o aumento da área foliar e da biomassa aérea. Reforçando a importância de considerar simultaneamente dimensão, arquitetura e função do sistema radicular na interpretação da nutrição mineral e do crescimento inicial de espécies perenes.

4.4 Relações entre nutrientes minerais e crescimento

Ao longo do gradiente de AF, os indivíduos posicionados no extremo superior apresentaram maiores conteúdos foliares absolutos de macro e micronutrientes, refletindo a maior magnitude da área foliar desenvolvida. A variação observada nos teores foliares foi, em geral, de menor amplitude do que a variação observada para os conteúdos, evidenciando que o aumento da AF esteve associado principalmente ao incremento do conteúdo total de nutrientes nas folhas.

A eficiência de utilização de nutrientes minerais (EU) constitui um elo conceitual entre o suprimento nutricional à parte aérea e a conversão desse suprimento em crescimento. No presente estudo, os índices de EU apresentaram ampla variabilidade intraespecífica, com diferenças entre indivíduos posicionados ao longo do gradiente de área foliar, indicando que a eficiência com que os nutrientes foram convertidos em biomassa variou substancialmente dentro da população avaliada.

De acordo com a abordagem clássica proposta por Siddiqi e Glass (1981), a EU integra processos fisiológicos, bioquímicos e estruturais que ocorrem após a absorção do nutriente, refletindo a capacidade da planta de utilizá-lo para a produção de matéria seca. Nesse sentido, os maiores valores médios de EU observados nos indivíduos posicionados no extremo superior do gradiente de área foliar indicam que, além de apresentarem maior suprimento absoluto de nutrientes (EATf elevada), essas plantas foram capazes de converter esse suprimento em biomassa de forma mais eficiente.

A hierarquia observada entre os nutrientes quanto aos valores médios de EU, com maiores valores para P, seguidos por S e Mg, e valores inferiores para Ca e micronutrientes, é consistente com diferenças conhecidas nas funções metabólicas, na mobilidade interna e nos custos de utilização desses elementos. Nutrientes diretamente envolvidos em processos metabólicos centrais, como P e S, tendem a apresentar maior retorno em biomassa por unidade acumulada, enquanto elementos predominantemente estruturais ou com funções regulatórias específicas podem apresentar menores valores de EU (Chapin, 1980; Marschner, 2012).

É importante destacar que a avaliação da EU permitiu dissociar variações associadas à diluição ou concentração dos nutrientes daquelas efetivamente relacionadas à eficiência funcional. Abordagens baseadas exclusivamente em teores foliares podem mascarar diferenças

reais de eficiência, especialmente em populações com ampla variação de porte, como observado neste estudo. Ao relacionar massa e teores, a análise da EU capturou de forma mais direta a relação entre investimento nutricional e produção de biomassa, conforme recomendado por Siddiqi e Glass (1981) e por estudos subsequentes (Rose et al., 2011; Weih et al., 2011).

A associação entre maiores valores de EU e indivíduos de maior porte sugere que, em parte, a eficiência de utilização dos nutrientes esteve associada ao tamanho da planta, na população avaliada, em consonância com os efeitos de escala associados ao porte discutidos no item 4.1. Nesse contexto, plantas maiores tendem a apresentar maior capacidade de redistribuição interna de nutrientes, maior integração entre órgãos e maior proporção de tecidos metabolicamente ativos em relação aos tecidos de suporte, especialmente em estádios iniciais de crescimento (Poorter et al., 2012; Reich, 2014).

Entretanto, a elevada variabilidade intraespecífica observada para os índices de EU, mesmo entre indivíduos de porte semelhante, indica que o tamanho da planta não explica integralmente as diferenças de eficiência. Esse padrão sugere a coexistência de estratégias contrastantes de uso de nutrientes dentro da população, possivelmente associadas a diferenças genéticas, a variações sutis na arquitetura dos órgãos de aquisição ou a ajustes fisiológicos no metabolismo dos nutrientes, aspectos frequentemente relatados em espécies perenes e em palmeiras (Aerts & Chapin, 2000; Lambers et al., 2008).

Em conjunto, os resultados indicam que a eficiência de utilização de nutrientes minerais nas mudas de macaúba refletiu a interação entre o suprimento nutricional à parte aérea, a escala estrutural da planta e a capacidade de conversão dos nutrientes absorvidos em biomassa. A integração entre EATf e EU observada neste estudo reforça a importância de abordagens baseadas em conteúdos e em gradientes funcionais para a compreensão do crescimento inicial e da nutrição mineral de espécies perenes.

4.5 Regulação fisiológica do uso da água e do carbono ao longo do gradiente de porte

Os resultados revelam que a regulação fisiológica do uso de C e de água nas mudas de macaúba esteve fortemente associada ao gradiente de porte da planta, expresso pela área foliar total. Indivíduos de maior porte apresentaram maiores valores absolutos de fotossíntese líquida integrada, condutância estomática e transpiração, refletindo principalmente a maior extensão

da superfície fotossintetizante e a consequente ampliação da capacidade de troca gasosa por planta.

A associação positiva entre fotossíntese líquida integrada e condutância estomática indica que o aumento da assimilação de C esteve acompanhado por maior abertura estomática, evidenciando um controle fisiológico coerente entre difusão de CO₂ e perda de água. Esse padrão é amplamente descrito na literatura como resultado do acoplamento funcional entre assimilação fotossintética e condutância estomática, mediado por demandas metabólicas e hidráulicas da planta (Farquhar & Sharkey, 1982; Medlyn et al., 2011). No contexto deste estudo, tal acoplamento sugere que o incremento dos fluxos gasosos em plantas de maior porte ocorreu sem evidências de desacoplamento fisiológico ou limitação estomática acentuada.

Entretanto, a análise das métricas de eficiência instantânea do uso da água revelou um contraste importante entre escalas absolutas e relativas. Embora os indivíduos de maior porte tenham apresentado maiores valores absolutos de transpiração e assimilação de C, a eficiência intrínseca do uso da água (iWUE), expressa pela razão entre fotossíntese e condutância estomática, não aumentou proporcionalmente com o porte, apresentando valores semelhantes ou ligeiramente inferiores aos observados em indivíduos menores. Esse resultado indica que o aumento do porte esteve associado principalmente à ampliação da escala dos fluxos fisiológicos, e não a uma melhoria intrínseca da eficiência estomática.

Esse padrão é consistente com observações de que plantas maiores frequentemente exibem maior demanda transpiratória e maior condutância estomática para sustentar taxas elevadas de assimilação, sem necessariamente apresentar maior eficiência no uso da água por unidade de abertura estomática (Lambers et al., 2008; Reich, 2014). Assim, diferenças em iWUE tendem a refletir estratégias fisiológicas específicas ou respostas a estresses ambientais, enquanto o porte da planta domina a variação nos fluxos absolutos de C e água em condições relativamente homogêneas.

A PCA reforçou essa interpretação ao posicionar a fotossíntese líquida integrada como variável de alta carga no primeiro componente principal, associado ao gradiente de porte, enquanto a iWUE se organizou em um eixo funcional secundário, independente da escala estrutural, corroborando a ideia de que atributos fisiológicos de eficiência podem variar independentemente do crescimento absoluto (Medlyn et al., 2011; de Boer et al., 2016).

Além disso, a relação positiva observada entre fotossíntese integrada e biomassa total indica que a maior assimilação absoluta de carbono em indivíduos de maior porte foi efetivamente convertida em crescimento, reforçando a coerência funcional entre aquisição de C e acúmulo de biomassa. No entanto, como discutido anteriormente, esse padrão não implica necessariamente maior eficiência fisiológica por unidade de área foliar, mas sim maior capacidade integrada de assimilação associada à expansão das superfícies de aquisição.

Em suma os resultados mostram que a regulação fisiológica do uso de C e de água nas mudas de macaúba foi fortemente condicionada pelo porte da planta, com aumento coordenado dos fluxos absolutos de trocas gasosas em indivíduos maiores. Ao mesmo tempo, a relativa independência da *i*WUE em relação ao porte sugere que ajustes finos de eficiência estomática não foram o principal mecanismo modulador do crescimento inicial, reforçando a dominância dos efeitos de escala estrutural sobre a variação fisiológica observada na população avaliada.

4.6. Papel funcional do caule saxofone na modulação da alocação de biomassa e das superfícies de aquisição

O caule saxofone constitui um compartimento estrutural e funcional distintivo no desenvolvimento inicial de palmeiras, desempenhando papel central na alocação de C, água e nutrientes durante a fase de estabelecimento. No presente estudo, a elevada participação do caule saxofone na biomassa total das mudas de macaúba evidencia que uma fração substancial dos recursos assimilados não foi imediatamente direcionada à expansão das superfícies de aquisição folhas e raízes, mas alocada em um compartimento de reserva e sustentação estrutural.

Esse padrão de alocação sugere a existência de um trade-off funcional entre o investimento direto em superfícies de aquisição de recursos e o investimento em tecidos de reserva, capazes de sustentar o crescimento futuro e conferir maior resiliência à planta. Diferentemente de um antagonismo estrito, esse trade-off deve ser interpretado como um compromisso estratégico, no qual a construção do caule saxofone atua modulando temporalmente aquisição, utilização e armazenamento de recursos.

Do ponto de vista do C, a alocação expressiva no caule saxofone implica que parte da assimilação fotossintética integrada observada nos indivíduos de maior porte foi direcionada à

formação de tecidos estruturalmente densos e metabolicamente menos ativos no curto prazo. Esse padrão ajuda a explicar por que, mesmo em indivíduos com elevada área foliar, sistemas radiculares desenvolvidos e altos fluxos absolutos de assimilação líquida de C, a conversão imediata desses fluxos em biomassa funcional de folhas e raízes não foi proporcional. Assim, o caule saxofone atua como um compartimento amortecedor, atenuando a conversão imediata da aquisição de C em crescimento instantâneo das superfícies de aquisição.

Sob a ótica da nutrição mineral, a presença desse compartimento de reserva também influencia a interpretação das eficiências nutricionais. Nutrientes absorvidos pelas raízes e translocados para a parte aérea podem ser parcialmente retidos no caule saxofone, reduzindo sua disponibilidade imediata para folhas metabolicamente ativas. Esse mecanismo contribui para modular tanto a eficiência integrada de suprimento nutricional à folha (EATf) quanto a eficiência de utilização de nutrientes (EU), reforçando a necessidade de interpretar esses índices à luz da alocação interna de biomassa e nutrientes, e não apenas como funções diretas das superfícies de aquisição.

Nesse contexto, o trade-off entre investimento em caule saxofone e investimento direto em folhas e raízes não representa uma limitação funcional, mas sim uma estratégia adaptativa típica de espécies perenes, especialmente palmeiras. A construção precoce de um compartimento de reserva permite maior estabilidade mecânica, maior capacidade de rebrota e maior tolerância a variações ambientais futuras, ainda que à custa de uma menor taxa de retorno imediato em termos de expansão das superfícies de aquisição.

A PCA fornece suporte adicional a essa interpretação ao evidenciar que o primeiro eixo multivariado esteve fortemente associado à área foliar total, à área superficial radicular, aos conteúdos foliares de nutrientes e à fotossíntese líquida integrada, configurando um gradiente dominante de escala funcional. A elevada contribuição das variáveis estruturais e de aquisição nesse eixo indica que o crescimento inicial das mudas foi governado por um aumento coordenado do porte e das superfícies de aquisição. No entanto, a expressiva participação da biomassa do caule saxofone na composição total das plantas sugere que parte relevante desse incremento estrutural esteve associada à alocação em compartimentos de reserva, modulando a conversão imediata dos fluxos de carbono e nutrientes em crescimento funcional de folhas e raízes. Esse padrão reforça que o gradiente capturado pelo primeiro componente principal incorpora não apenas variações de porte, mas também diferenças sistemáticas na alocação interna de biomassa, conferindo significado funcional ao eixo dominante da PCA ao evidenciar

que o porte da planta incorpora simultaneamente expansão das superfícies de aquisição e decisões de alocação interna mediadas pelo caule saxofone.

Nesse contexto, a posição das mudas ao longo do primeiro componente principal reflete não apenas diferenças na capacidade de aquisição de recursos, mas também diferenças na estratégia de alocação interna, nas quais o caule saxofone exerce papel como mediador entre aquisição, armazenamento e crescimento. Essa interpretação confere significado funcional ao eixo dominante da PCA, ao evidenciar que o porte da planta incorpora simultaneamente expansão das superfícies de aquisição e a alocação mediadas pelo caule saxofone.

A integração dos resultados discutidos nas seções anteriores sugere que o efeito do porte da planta sobre a aquisição e utilização de recursos não pode ser compreendido sem considerar o papel modulador do caule saxofone. Enquanto folhas e raízes definem a escala das superfícies de aquisição acima e abaixo do solo, o caule saxofone regula a dinâmica temporal da alocação, mediando o balanço entre crescimento imediato e investimento em reserva. Assim, o porte da planta emerge não apenas como resultado da expansão coordenada das superfícies de aquisição, mas também como consequência de estratégias de alocação que condicionam a eficiência aparente dos sistemas foliar e radicular.

O caule saxofone mostrou exercer papel ativo na modulação dos padrões de alocação em mudas de macaúba, configurando um trade-off funcional que influencia a expressão das eficiências fisiológicas e nutricionais durante o crescimento inicial. Essa perspectiva reforça a importância de incorporar compartimentos de reserva explícitos na análise da ecologia funcional e da nutrição mineral de palmeiras e espécies perenes.

5. CONCLUSÕES

O crescimento de mudas de macaúba, na fase de viveiro, está principalmente associado à expansão coordenada da biomassa e da extensão da superfície foliar, a qual integra estrutura, fisiologia e estado nutricional; enquanto a eficiência estrutural de uso do carbono exerce papel secundário.

O acúmulo de nutrientes na folha está associado principalmente à massa e à extensão da superfície radicular, sendo secundário o efeito de sua arquitetura.

A eficiência de utilização de nutrientes minerais em mudas de macaúba aumenta com a área foliar, com padrões dependentes do nutriente. Adicionalmente, o conteúdo de P nas folhas esteve altamente correlacionado com a área superficial radicular das plantas.

A taxa de assimilação líquida instantânea de carbono e os índices instantâneos de uso de água em mudas de macaúba são predominantemente controlados pela condutância estomática, evidenciando um desacoplamento parcial entre investimentos estruturais de longo prazo e a regulação fisiológica de curto prazo, e reforçando a importância da escala temporal na interpretação das trocas gasosas.

O caule saxofone exerce papel funcional central na alocação interna de biomassa, atuando como compartimento estrutural de acúmulo associado à expansão das superfícies funcionais.

6. REFERENCIAS

- AERTS, R.; CHAPIN III, F. S. **The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns.** *Advances in Ecological Research*, Londres, v. 30, p. 1-67, 2000.
- ARAUJO, L. V.; COSTA, C. R.; NOSSE, N, K; SOUSA, N, D LIRIA, C. W. **Estudo do Potencial da Macaúba como alternativa promissora na produção de biodiesel.** Faculdade Osvaldo Cruz. P.1-12, 2023.
- ATKINSON, J. A.; POUND, M. P.; BENNETT, M. J.; WELLS, D. M. **Uncovering the hidden half of plants using new advances in root phenotyping.** *Current Opinion in Biotechnology*, Volume 55, 2019, ISSN 0958-1669, <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.06.002>.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. **Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas.** *Revista Ceres*, v. 21, n. 113, p. 73 – 85, 1974.
- CHAPIN III, F. S. **The mineral nutrition of wild plants.** *Annual Review of Ecology and Systematics*, Palo Alto, v. 11, p. 233-260, 1980.
- CHAPIN III, F. S.; SCHULZE, E.-D.; MOONEY, H. A. **The ecology and economics of storage in plants.** *Annual Review of Ecology and Systematics*, Palo Alto, v. 21, p. 423-447, 1990.
- CORREA, José et al. **Soil compaction and the architectural plasticity of root systems.** *Journal of experimental botany*, v. 70, n. 21, p. 6019-6034, 2019.
- DE BOER, H. J.; PRICE, C. A.; WAGNER-CREMER, F.; DEKKER, S. C.; FRANKS, P. J.; VENEKLAAS, E. J. **Optimal allocation of leaf epidermal area for gas exchange.** *New Phytologist*, Oxford, v. 210, n. 4, p. 1219-1228, 2016.
- E SOUZA, J.N.; RIBEIRO, L.M.; MERCADANTE-SIMÕES, M.O. **Ontogenesis and functions of saxophone stem in *Acrocomia aculeata* (Arecaceae).** *Ann Bot.* 2017 Feb;119(3):353-365. doi: 10.1093/aob/mcw215. Epub 2016 Dec 27. PMID: 28028018; PMCID: PMC5314641.
- FARQUHAR, G. D.; SHARKEY, T. D. **Stomatal conductance and photosynthesis.** *Annual Review of Plant Physiology*, Palo Alto, v. 33, p. 317-345, 1982.
- FITTER, A. H. **An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems.** *New Phytologist*, Oxford, v. 106, p. 61-77, 1987.
- FITTER, A. H.; STICKLAND, T. R.; HARVEY, M. L.; WILSON, G. W. **Root system architecture determines fitness in an *Arabidopsis* mutant in competition for immobile phosphate ions but not for nitrate ions.** *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Londres, v. 269, n. 1494, p. 1313-1318, 2002.
- FRESCHET, G. T.; SWART, E. M.; CORNELISSEN, J. H. C. **Integrated plant phenotypic responses to resource availability.** *New Phytologist*, Oxford, v. 205, n. 4, p. 1246-1257, 2015.

FRESCHET, G. T.; ROUMET, C.; COMAS, L. H.; WEEMSTRA, M.; BENGOUGH, A. G.; REWALD, B.; BARDGETT, R. D.; DE DEYN, G. B.; JOHNSON, D.; KLIMEŠOVÁ, J.; LUKAC, M.; MCCORMACK, M. L.; MEIER, I. C.; PAGÈS, L.; POORTER, H.; PRIETO, I.; WURZBURGER, N.; ZADWORNÝ, M.; BAGNIEWSKA-ZADWORNÁ, A.; BLANCHET, F. G.; BRUNNER, I.; GESSLER, A.; HOBBIE, S. E.; IVERSEN, C. M.; MOMMER, L.; PICON-COCHARD, C.; POSTMA, J. A.; SCHERER-LORENZEN, M.; STOKES, A.; TURNER, B. L. **Root traits as drivers of plant and ecosystem functioning: current understanding, pitfalls and future research needs.** *New Phytologist*, Oxford, v. 229, n. 3, p.1123-1158, 2021.

KAISER, H. F. (1960). **The Application of Electronic Computers to Factor Analysis.** *Educational and Psychological Measurement*, 20, 141-151. <http://dx.doi.org/10.1177/001316446002000116>

PÉRET, B.; DESNOS, T.; JOST, R.; KANNO, S.; BERKOWITZ, O.; NUSSAUME, L. **Root architecture responses: in search of phosphate.** *Plant Physiol.* 2014 Dec;166(4):1713-23. doi: 10.1104/pp.114.244541. Epub 2014 Oct 23. PMID: 25341534; PMCID: PMC4256877.

LAMBERS, H.; CHAPIN III, F. S.; PONS, T. L. **Plant Physiological Ecology.** New York: Springer, 2008.

LAMBERS, H.; SHANE, M. W.; CRAMER, M. D.; PEARSE, S. J.; VENEKLAAS, E. J. **Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits.** *Annals of Botany*, Oxford, v. 98, n. 4, p. 693-713, 2006.

LYNCH, J. P. **Root architecture and plant productivity.** *Plant Physiology*, Rockville, v. 109, n. 1, p. 7-13, 1995.

LYNCH, J. P. **Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops.** *Plant Physiology*, Rockville, v. 156, n. 3, p. 1041-1049, 2011.

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. **New roots for agriculture.** *Trends in Plant Science*, Amsterdam, v. 17, n. 7, p. 327-334, 2012.

MARCHENER, P. Marschener's. **Mineral Nutrition of Higher Plants.** 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas.** Piracicaba: Potafós, 1997. 319 p.

MEDLYN, B. E.; DUURSMA, R. A.; EAMUS, D.; ELLSWORTH, D. S.; PRENTICE, I. C.; BARTON, C. V. M.; CROUS, K. Y.; DE ANGELIS, P.; FREEMAN, M.; WINGATE, L. **Reconciling the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance.** *Global Change Biology*, Hoboken, v. 17, n. 6, p. 2134-2144, 2011.

MERCHAN, F.; CRESPI, M. **Plant root growth, architecture and function.** *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 321, n. 1-2, p. 153-187, 2009.

MOTOIKE, S. Y.; LOPES, F. A.; SÁ JÚNIOR, A. Q. de; et al. **Processo de germinação e produção de sementes pré-germinadas de palmeiras do gênero *Acrocomia*.** Patente: PI0703180-7. 2007.

- NIKLA, K. J. **Plant allometry: is there a grand unifying theory?**. Biological Reviews, Cambridge, v. 79, n. 4, p. 871-889, 2004.
- NIKLA, K. J. **Plant allometry, leaf nitrogen and photosynthesis**. Plant, Cell & Environment, Hoboken, v. 29, n. 2, p. 170-184, 2006.
- PAGÈS, L.; VERCAMBRE, G.; DROUET, J.-L.; LECOMPTE, F.; COLLET, C.; LE BOT, J. **Root system architecture: from its representation to the study of its elaboration**. Plant and Soil, Dordrecht, v. 261, n. 1-2, p. 1-20, 2004.
- POORTER, H.; LAMBERS, H.; EVANS, J. R. **Trait variation and plasticity in plant growth**. New Phytologist, Oxford, v. 205, n. 4, p. 1041-1054, 2015.
- POORTER, H.; NIINEMETS, Ü.; POORTER, L.; WRIGHT, I. J.; VILLAR, R. **Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis**. New Phytologist, Oxford, v. 182, n. 3, p. 565-588, 2009.
- POORTER, H.; NIKLAS, K. J.; REICH, P. B.; OLEKSYN, J.; POOT, P.; MOMMER, L. **Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control**. New Phytologist, Oxford, v. 193, n. 1, p. 30-50, 2012.
- REICH, P. B.; WALTERS, M. B.; ELLSWORTH, D. S. **From tropics to tundra: global convergence in plant functioning**. Proceedings of the National Academy of Sciences, Washington, v. 94, n. 25, p. 13730-13734, 1997.
- REICH, P. B. **The world-wide "fast-slow" plant economics spectrum: a traits manifesto**. Journal of Ecology, Oxford, v. 102, n. 2, p. 275-301, 2014.
- RIBEIRO, Jéssica Araújo Heringer et al. **Importância ecossistêmica das raízes: Uma revisão de literatura**. Research, Society and Development, v. 13, n. 3, p. e0313345177, 2024.
- ROSE, T. J.; LIU, L.; WISSUWA, M. **Improving phosphorus efficiency in cereal crops: is breeding for reduced grain phosphorus concentration part of the solution?** Frontiers in Plant Science, Lausanne, v. 2, p. 1-9, 2011.
- SILVA, A. A.; DELATORRE, C. A. **Alterações na arquitetura de raiz em resposta à disponibilidade de fósforo e nitrogênio**. Revista de Ciências Agroveterinárias. Lages, v.8, n.2, p. 152-163, 2009. ISSN 1676-9732.

CAPÍTULO 2

Cloro na Diagnose Nutricional Composicional da Palma De Óleo

RESUMO

A diagnose nutricional em culturas perenes tem recorrido crescentemente a abordagens multinutrientes que consideram explicitamente as interações entre nutrientes. O método da Diagnose Nutricional Composicional (CND) fornece um arcabouço rigoroso para esse propósito; entretanto, sua aplicação prática tem sido historicamente restrita a 11 nutrientes rotineiramente determinados nas análises foliares, sendo frequentemente excluídos cloro (Cl), sódio (Na) e alumínio (Al), apesar de sua presença nos tecidos vegetais e de sua potencial relevância para o balanço iônico. Este estudo avaliou os efeitos da inclusão de Cl, Na e Al na diagnose nutricional da palma de óleo por meio do CND, comparando estruturas composicionais tradicionais e expandidas em plantios comerciais do estado do Pará. Os impactos da expansão composicional foram analisados em relação às normas multinutrientes de referência, à estrutura multivariada do balanço nutricional, às relações de balanço iônico, à classificação e à concordância diagnósticas, bem como à estimativa de teores foliares ótimos composicionais dos nutrientes. A expansão do espaço composicional promoveu reorganização sistemática das normas multinutrientes e deslocamentos no referencial composicional. A análise do balanço iônico indicou que o cloro exerce papel dominante na reorganização estrutural do sistema, enquanto o sódio apresentou efeitos mais fracos e dependentes do contexto nutricional, e o alumínio mostrou comportamento estruturalmente neutro. Esses efeitos mostraram-se invariantes entre estratos de produtividade. As análises multivariadas confirmaram que a expansão composicional altera a geometria interna das relações entre nutrientes, com o cloro associado ao eixo primário de reorganização multinutriente. A concordância diagnóstica entre as estruturas tradicional e expandida, avaliadas tanto sob esquemas de inclusão quanto de exclusão conforme a referência adotada, reduziu-se de forma acentuada quando aplicados limiares fixos aos índices CND (ICND), enquanto a classificação baseada em referências internas específicas por talhão (PRA) apresentou maior coerência diagnóstica em todas as configurações composicionais avaliadas. A calibração entre os índices CND e as concentrações foliares demonstrou que os teores ótimos nutricionais composicionais dependem do equilíbrio multinutriente e se deslocam sistematicamente em função da dimensionalidade do espaço composicional, para todos os nutrientes rotineiramente diagnosticados. Em conjunto, os resultados indicam que diagnósticos e teores ótimos nutricionais constituem propriedades emergentes da configuração composicional adotada. A inclusão do cloro na diagnose

nutricional composicional da palma de óleo é fundamental para uma inferência estruturalmente robusta, mecanisticamente interpretável e funcionalmente alinhada à produtividade relativa dos plantios, enquanto expansões adicionais do espaço composicional, incorporando sódio e alumínio, atuam como moduladores secundários que contribuem para a estabilidade estatística e a relevância agronômica da diagnose multinutriente.

Palavras-chave: *Elaeis guineenses*; CND; Balanço-nutricional.

ABSTRACT

Nutritional diagnosis in perennial crops has increasingly relied on multinutrient approaches that explicitly account for interactions among nutrients. The Compositional Nutrient Diagnosis (CND) method provides a rigorous framework for this purpose; however, its practical application has historically been restricted to 11 nutrients routinely determined in leaf analyses, often excluding chlorine (Cl), sodium (Na), and aluminum (Al), despite their presence in plant tissues and their potential relevance to ionic balance. This study evaluated the effects of including Cl, Na, and Al in the nutritional diagnosis of oil palm using the CND approach, comparing traditional and expanded compositional structures in commercial plantations in the Brazilian Amazon. The impacts of compositional expansion were assessed in terms of multinutrient reference norms, the multivariate structure of nutritional balance, ionic balance relationships, diagnostic classification and concordance, and the estimation of compositional optimal leaf nutrient concentrations. Expansion of the compositional space promoted systematic reorganization of multinutrient norms and shifts in the compositional reference system. Ionic balance analysis indicated that chlorine plays a dominant role in the structural reorganization of the system, whereas sodium exhibited weaker, context-dependent effects, and aluminum showed structurally neutral behavior. These effects were invariant across productivity strata. Multivariate analyses confirmed that compositional expansion alters the internal geometry of nutrient relationships, with chlorine associated with the primary axis of multinutrient reorganization. Diagnostic concordance between traditional and expanded structures—evaluated under both inclusion- and exclusion-based schemes depending on the reference adopted—decreased markedly when fixed thresholds were applied to CND indices (ICND), whereas classification based on plot-specific internal references (PRA) exhibited greater diagnostic coherence across all compositional configurations evaluated. Calibration between CND indices and leaf nutrient concentrations demonstrated that compositional optimal nutrient concentrations depend on multinutrient balance and shift systematically with the dimensionality of the compositional space for all routinely diagnosed nutrients. Taken together, the results indicate that nutritional diagnoses and optimal nutrient concentrations are emergent properties of the compositional framework adopted. Explicit inclusion of chlorine in the compositional nutritional diagnosis of oil palm is therefore essential for structurally robust, mechanistically interpretable, and agronomically meaningful inference aligned with relative plantation productivity, while further expansion of the compositional space to include sodium

and aluminum acts as a secondary modulation that enhances the statistical stability and agronomic relevance of multinutrient diagnosis.

Keywords: *Elaeis guineenses*; CND; Nutritional balance.

1. INTRODUÇÃO

A diagnose nutricional baseada na análise de tecidos vegetais constitui uma ferramenta central para a avaliação do estado nutricional das culturas. Essa diagnose pode ser realizada tanto pela interpretação das concentrações foliares de nutrientes, por meio de faixas críticas associadas à produtividade, quanto por abordagens voltadas à avaliação do equilíbrio nutricional. Entre estas últimas, destacam-se o Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) e a Diagnose Nutricional Composicional (CND), que se baseiem em pressupostos matemáticos distintos (Walworth e Sumner, 1987; Parent e Dafir, 1992). Enquanto o DRIS se fundamenta em razões bivariadas entre nutrientes, o CND adota uma formulação explicitamente composicional, na qual todos os componentes da composição mineral são expressos simultaneamente em relação à média geométrica da composição total. Essa formulação permite a análise multivariada em um espaço composicional fechado, sob as restrições inerentes aos dados composicionais.

No contexto do CND, as concentrações foliares de nutrientes são tratadas como dados composicionais sujeitos à restrição de fechamento, de modo que a composição mineral ocupa um espaço de dimensão. Essa propriedade impõe dependência estrutural entre os componentes e resulta em matrizes de covariância singulares, o que impede a aplicação direta de métodos estatísticos clássicos a concentrações absolutas. Conseqüentemente, são necessárias transformações log-razão, baseadas na média geométrica da composição, para a adequada análise estatística das relações entre nutrientes (Aitchison, 1986; Parent et al., 2013).

Apesar desse avanço conceitual em relação ao DRIS, as aplicações práticas do CND têm sido historicamente restritas a um conjunto limitado de nutrientes, geralmente excluindo cloro (Cl^-), sódio (Na^+) e alumínio (Al^{3+}). Essa restrição contrasta com o conhecimento fisiológico acumulado para culturas perenes tropicais particularmente espécies de palmeiras nas quais esses elementos participam, em diferentes níveis, do sistema iônico das plantas e contribuem quantitativamente para a composição mineral dos tecidos.

O cloro é reconhecido como nutriente desde meados do século XX (Broyer et al., 1954) e desempenha funções que vão além de seu papel no fotossistema II, incluindo a osmorregulação, o balanço de cargas e a regulação estomática. Em espécies de palmeiras, as concentrações foliares de Cl^- são frequentemente elevadas, atingindo valores comparáveis aos de vários macronutrientes comumente quantificados na diagnose foliar, refletindo sua importância quantitativa na composição iônica dos tecidos. Sínteses recentes têm consolidado

o papel do Cl^- nas relações hídricas das plantas e na eficiência funcional sob diversas condições ambientais (Geilfus, 2018; Colmenero-Flores et al., 2019).

O sódio, embora não classificado como nutriente, é amplamente reconhecido como elemento funcional ou benéfico. Ele pode substituir parcialmente o K^+ em funções osmóticas e na manutenção do turgor, além de atuar como cátion acompanhante no transporte a longa distância, dependendo da espécie e das condições ambientais (Maathuis, 2014; Sarraf et al., 2023). O alumínio, por sua vez, tem sido tradicionalmente associado à toxicidade em solos ácidos e, em ambientes tropicais, sua presença na solução do solo é muito frequente. Espécies adaptadas apresentam mecanismos de tolerância, compartimentalização e detoxificação, resultando em concentrações mensuráveis nos tecidos sem prejuízo aparente ao crescimento (Bojórquez-Quintal et al., 2017; Kochian et al., 2015; Poschenrieder et al., 2008; Chakraborty et al., 2024).

O método CND é particularmente sensível à inclusão ou exclusão de componentes, uma vez que as variáveis multinutrientes são expressas em relação à média geométrica da composição completa. Assim, a omissão de íons que são absorvidos e estão presentes nos tecidos altera o fechamento composicional e o posicionamento relativo de todos os nutrientes no espaço multivariado (Aitchison, 1986; Parent e Dafir, 1992; Parent et al., 2013). Evidência empírica dessa sensibilidade do CND à expansão composicional foi apresentada por Deus et al. (2018), que incorporaram Na e Al ao conjunto composicional da bananeira 'Prata', demonstrando que ambos os elementos participam do sistema iônico foliar e influenciam normas multinutrientes e índices diagnósticos. Esse estudo foi intencionalmente focado em Na e Al e não abordou o cloro, cuja relevância fisiológica e contribuição quantitativa diferem de forma marcante entre espécies cultivadas.

Em espécies de palmeiras, contudo, o cloro frequentemente se acumula em elevadas concentrações nos tecidos foliares e desempenha papéis bem estabelecidos no balanço iônico, na osmorregulação e nas relações hídricas das plantas. Esse contraste entre culturas ressalta a importância de avaliar a inclusão do Cl, além de Na e Al, no âmbito do CND para a palma de óleo, sem extrapolar conclusões entre espécies com características fisiológicas e balanço iônico distintos.

O presente estudo aborda essa lacuna ao incorporar explicitamente o Cl^- ao conjunto nutrientes do CND para a palma de óleo e avalia as consequências dessa inclusão sobre normas multinutrientes, estrutura multivariada do balanço nutricional, padrões de balanço iônico e

comportamento diagnóstico, em comparação com estruturas composicionais tradicionais. Ao examinar múltiplas configurações composicionais, o estudo busca avaliar como a expansão do conjunto de nutrientes modifica o sistema de referência diagnóstica.

Além dos aspectos estruturais, uma implicação adicional e ainda pouco explorada do CND refere-se à estimativa das concentrações foliares de nutrientes associadas ao equilíbrio composicional, isto é, à condição em que um nutriente ocorre em proporção compatível com a composição nutricional global da folha. Essas concentrações podem ser inferidas por meio do ajuste de equações entre concentrações foliares e seus respectivos índices CND, permitindo uma interpretação quantitativa do estado nutricional dependente do equilíbrio. Como a inclusão de componentes adicionais modifica o fechamento do sistema composicional, é plausível que essas relações de calibração e, conseqüentemente, as estimativas de teores ótimos composicionais também dependam do arcabouço composicional adotado, redefinindo referências diagnósticas quantitativas para a palma de óleo. Assim, o objetivo do estudo foi avaliar como a expansão do espaço composicional do método da Diagnose Nutricional Composicional (CND), pela inclusão explícita de Cl, Na e Al, afeta a estrutura diagnóstica, o balanço iônico, a coerência multivariada e a interpretação agrônômica do estado nutricional da palma de óleo.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar como a expansão do espaço composicional do método da Diagnose Nutricional Composicional (CND), pela inclusão explícita de Cl, Na e Al, afeta a estrutura diagnóstica, o balanço iônico, a coerência multivariada e a interpretação agrônômica do estado nutricional da palma de óleo.

2.1. Objetivos específicos

- Avaliar o impacto da inclusão e da exclusão de Cl, Na e Al sobre as normas multinutrientes de referência e os índices CND, quantificando alterações na tendência central, na dispersão e na hierarquia relativa dos nutrientes.

- Quantificar a hierarquia de efeitos de Cl, Na e Al na reorganização estrutural do espaço composicional, distinguindo contribuições dominantes e secundárias para a geometria multivariada do equilíbrio nutricional.
- Avaliar os efeitos da expansão composicional sobre as relações de balanço iônico, testando se a inclusão de Cl, Na e Al induz reorganização estrutural sistemática e se essas relações permanecem invariantes ao longo dos estratos de produtividade.
- Comparar a concordância diagnóstica entre os arcabouços composicionais tradicional e expandido sob faixas fixas dos Índices Diagnóstico Composicional Nutricional (ICND) e sob referências internas específicas por talhão (PRA), avaliando a sensibilidade de cada critério a deslocamentos globais do espaço composicional.
- Estimar, para cada nutriente, as concentrações foliares associadas ao equilíbrio composicional por meio de funções de calibração índice–concentração e avaliar como os teores ótimos nutricionais variam em função da estrutura composicional adotada, com foco na assertividade agrônômica da diagnose.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo e conjunto de dados

O estudo foi conduzido com base em um conjunto de dados composto por 304 talhões comerciais de palma de óleo com idade superior a cinco anos, localizados em diferentes municípios do estado do Pará, Brasil. Para cada talhão, estavam disponíveis informações referentes às concentrações foliares de nutrientes (folha diagnóstica 17), produtividade de cachos de frutos frescos, material genético, ano de plantio e data de amostragem (Tabela 1). A descrição dos solos das áreas experimentais, constam na Tabela 2.

Os nutrientes quantificados foram N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Cl, Na e Al. As normas nutricionais de referência foram estabelecidas a partir da população de alta produtividade, definida como o quartil superior (quartil 4) de produtividade relativa de cachos de frutos frescos para a idade do plantio (CFFrel_idade, %).

Tabela 1. Estatísticas descritivas para Produção de Cachos de Frutos Frescos pela idade e teores de nutrientes e elementos da população de Palma de óleo (304) estudada

Variável	Unidade	n	Média	Desvio- Padrão	CV	Q1	Q2 (mediana)	Q3
Prod_CFF	%	304	52,92	21,52	40,67	43,37	55,11	64,29
N	g kg ⁻¹	304	25,30	2,28	9,010	23,66	25,20	26,56
P	g kg ⁻¹	304	1,68	0,17	10,44	1,53	1,65	1,763
K	g kg ⁻¹	304	10,90	1,46	13,41	9,81	10,88	11,69
Ca	g kg ⁻¹	304	7,12	1,201	16,89	6,22	7,13	7,89
Mg	g kg ⁻¹	304	2,51	0,57	22,65	2,13	2,54	2,86
S	g kg ⁻¹	304	1,88	0,23	12,09	1,72	1,85	2,03
B	g kg ⁻¹	304	0,012	0,002	17,765	0,011	0,012	0,014
Cu	g kg ⁻¹	304	0,007	0,001	15,564	0,006	0,007	0,008
Fe	g kg ⁻¹	304	0,147	0,046	31,451	0,119	0,136	0,160
Mn	g kg ⁻¹	304	0,276	0,109	39,438	0,191	0,271	0,342
Zn	g kg ⁻¹	304	0,018	0,004	20,645	0,015	0,018	0,020
Cl	g kg ⁻¹	304	7,591	1,382	18,204	6,563	7,630	8,675
Na	g kg ⁻¹	304	0,061	0,017	27,039	0,050	0,058	0,066
Al	g kg ⁻¹	304	0,145	0,082	56,523	0,094	0,125	0,171

Tabela 2. Estatísticas descritivas dos atributos químicos e físicos dos solos das áreas experimentais (n = 304).

	MO g/kg	pH	P mg/dm ³	K mg/dm ³	Na mg/dm ³	Ca cmol _c /dm ³	Mg cmol _c /dm ³	Al cmol _c /dm ³
Média	14.960	4.74	11.159	35.624	5.462	0.761	0.375	0.695
Quartil 1	10.985	4.49	2.760	22.503	4.130	0.388	0.250	0.430
Quartil 2 (Mediana)	14.210	4.68	5.520	31.090	5.640	0.610	0.350	0.670
Quartil 3	17.498	4.98	12.733	42.643	6.820	0.998	0.450	0.940
	H+Al cmol _c /dm ³	SB cmol _c /dm ³	V cmol _c /dm ³	m %	Areia Grossa g/kg	Areia Fina g/kg	Silte g/kg	Argila g/kg
Média	4.012	1.253	23.396	38.84	381.3	350.5	101.6	166.6
Quartil 1	3.144	0.793	16.228	24.17	326.4	312.0	77.0	140.0
Quartil 2 (Mediana)	3.860	1.064	21.585	38.49	380.2	344.5	98.0	168.9
Quartil 3	4.730	1.558	28.965	53.22	426.0	393.0	121.9	200.0

3.2 Diagnóstico nutricional composicional (CND)

A diagnose multinutriente foi realizada utilizando o método da Diagnóstico Nutricional Composicional (CND) (Parent e Dafir, 1992). Para cada talhão, o termo residual R foi calculado de modo a fechar a composição em 1.000 g:

$$R = 1000 - \sum t_i$$

em que t_i representa a concentração do nutriente i , em g kg^{-1} .

A média geométrica G da composição completa (nutrientes, n , + R) foi calculada como:

$$G = (t_1 \cdot t_2 \cdot \dots \cdot t_n \cdot R)^{1/(n+1)}$$

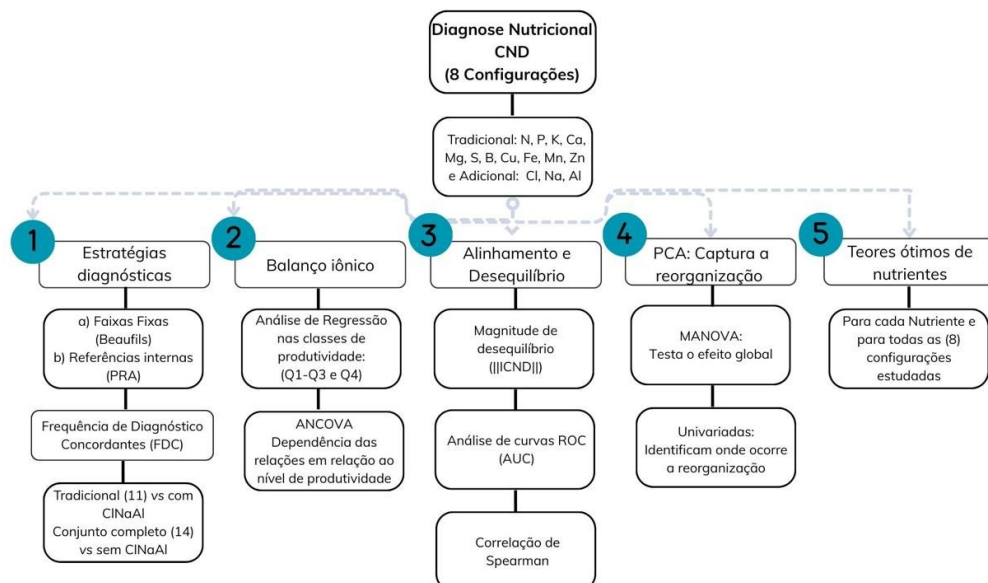
As variáveis multinutrientes foram então obtidas por:

$$V_i = \ln \left(\frac{t_i}{G} \right)$$

Foram avaliadas oito configurações composicionais: (i) o conjunto tradicional (sem Cl, Na e Al) e os conjuntos as configurações incluindo (ii) Cl, (iii) Na, (iv) Al, (v) Cl+Na, (vi) Cl+Al, (vii) Na+Al e (viii) Cl+Na+Al.

As normas multinutrientes obtidas para cada configuração foram estatisticamente comparadas às da configuração tradicional. Assim, para cada variável multinutriente, a média da configuração expandida foi comparada à média tradicional pelo teste t de Student, e as variâncias foram comparadas pelo teste F , ambos ao nível de 5 % de probabilidade.

Figura 1. Etapas da metodologia desenvolvida no estudo.



3.3 Estratégias diagnósticas

Foram avaliadas duas estratégias diagnósticas: *i)* “fixas” e *ii)* referências internas específicas por talhão.

3.3.1 Faixas “fixas” de limiares (análogas a Beaufils)

Os índices CND foram classificados utilizando cinco faixas: deficiente ($< -1,33$), tendência à suficiência ($-1,33$ a $-0,66$), suficiente ($-0,66$ a $0,66$), tendência ao excesso ($0,66$ a $1,33$) e excesso ($\geq 1,33$).

3.3.2 Referências internas específicas por talhão (classes de PRA)

Uma segunda estratégia foi baseada em referências internas específicas por talhão, nas quais os limiares diagnósticos variam de acordo com a condição nutricional de cada talhão. Essa abordagem foi originalmente proposta para o DRIS por Wadt (1996) e é aqui estendida aos índices CND. As classes diagnósticas foram definidas como: resposta positiva (p), resposta positiva ou nula (pz), resposta nula (z), resposta negativa ou nula (n) e resposta negativa (nz).

3.4 Análise de concordância e concordância diagnóstica

Para ambas as estratégias diagnósticas, ou seja, faixas “fixas” análogas a Beaufils e classes de PRA, foram calculadas as frequências de concordância diagnóstica, em nível de talhão, entre as configurações composicionais tradicionais (11) e expandidas (até configuração completa 14, ou seja, com Cl, Na, Al) para todos os nutrientes tradicionalmente diagnosticados. Isso foi feito tendo como referência o conjunto tradicional, de modo a avaliar o efeito das inclusões, como também sendo o conjunto de nutrientes completo, a referência, de modo a avaliar os efeitos das exclusões de Cl, Na, Al.

3.5 Análise do balanço iônico

Além da análise composicional, as diferentes configurações de nutrientes foram também avaliadas por meio de uma abordagem de balanço iônico, com o objetivo de examinar como a inclusão de Cl, Na e Al afeta a estrutura eletroquímica da composição nutricional.

As concentrações foliares de nutrientes foram convertidas para mol de carga ($\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$) de acordo com sua valência predominante. Os cátions incluíram K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Al^{3+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} e N (considerado como N-NH_4^+). Os ânions incluíram P, S e Cl^- . Os balanços iônicos foram comparados entre configurações por meio de análise de regressão.

Nas análises de regressão, o balanço iônico calculado para o conjunto de nutrientes tradicional foi utilizado como variável independente, enquanto o balanço iônico de cada configuração expandida foi utilizado como variável dependente. As regressões lineares foram ajustadas separadamente para estratos de produtividade definidos por quartis da produtividade de cachos de frutos frescos corrigida para idade.

Para aumentar a robustez e assegurar representação equilibrada, os talhões pertencentes ao primeiro, segundo e terceiro quartis de produtividade foram agrupados (Q1–Q3), enquanto o quarto quartil (Q4) foi analisado separadamente. Isso resultou em 228 pares de observações para Q1–Q3 e 76 pares de observações para Q4.

Essa abordagem estratificada permite avaliar se as relações estruturais entre os balanços iônicos diferiam entre condições de produtividade baixas e intermediárias (Q1–Q3) e elevada (Q4), preservando, ao mesmo tempo, tamanho amostral suficiente em cada estrato.

3.5.1 Identidade de modelos de regressão entre estratos de produtividade

Para testar se as relações entre balanços iônicos diferiam entre os estratos de produtividade, foi realizado um teste de identidade de modelos de regressão por meio de análise de covariância (ANCOVA). Para cada comparação entre o conjunto de nutrientes tradicional e cada conjunto expandido, foi ajustado o seguinte modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 G + \beta_3 (X \cdot Z) + \varepsilon$$

Em que X representa o balanço iônico do conjunto tradicional, Y o balanço iônico do conjunto expandido, e Z é um indicador binário do estrato de produtividade (Q1–Q3 = 0; Q4 = 1). O coeficiente β_2 testa diferenças nos interceptos entre os estratos, enquanto β_3 testa diferenças nas declividades. A hipótese conjunta $\beta_2 = \beta_3 = 0$ foi utilizada como critério formal de identidade dos modelos de regressão.

Como cada talhão contribuiu com um único par de observações, assumiu-se independência entre as unidades amostrais. Diferenças no tamanho amostral entre os estratos foram inerentemente tratadas no arcabouço da ANCOVA. Para aumentar a robustez frente à possível heterocedasticidade, foram utilizados erros-padrão robustos à heterocedasticidade em todos os testes de ANCOVA.

3.6 Alinhamento funcional entre desequilíbrio multinutriente e produtividade relativa

Para avaliar o alinhamento funcional entre a diagnose multinutriente e a produtividade, foi calculada a magnitude do desequilíbrio nutricional ($\|ICND\|$) como a norma euclidiana do vetor de índices CND dos 11 nutrientes clássicos, para cada talhão e para cada configuração composicional avaliada. A capacidade discriminatória de $\|ICND\|$ entre talhões de alta produtividade relativa (Q4) e aqueles pertencentes aos quartis inferiores (Q1–Q3) foi avaliada por análise de curvas ROC, expressa pela área sob a curva (AUC), utilizando $\|ICND\|$ como escore, de modo que valores mais elevados indicassem maior probabilidade de pertencimento ao grupo Q4.

As associações monotônicas entre $\|ICND\|$ e a produtividade relativa ajustada à idade foram avaliadas por correlação de Spearman (ρ). Diferenças na distribuição de $\|ICND\|$ entre os grupos Q4 e Q1–Q3 foram testadas pelo teste não paramétrico de Mann–Whitney. Todas as análises foram conduzidas mantendo-se fixa a população de referência diagnóstica dentro de cada configuração composicional.

3.7 Análises multivariadas e univariadas com modelos mistos

A análise de componentes principais (PCA) foi aplicada aos índices CND para cada configuração composicional (tradicional e expandidos), sendo retidos no modelo os componentes com autovalores ≥ 1 (Kaiser, 1960). Em seguida, foi realizada análise multivariada de variância (MANOVA) utilizando modelos lineares mistos aplicados aos escores dos componentes principais da (PCA), seguida por modelos lineares mistos univariados ajustados a cada índice CND. Essas análises multivariadas complementaram a abordagem de balanço iônico baseada em regressão, ao avaliar alterações na estrutura multinutriente dos índices CND entre configurações de nutrientes e classes de produtividade.

Em ambos os tipos de modelo (multivariado e univariado), Cl, Na e Al, suas interações e a classe de produtividade foram considerados efeitos fixos, enquanto o talhão foi tratado como efeito aleatório. O lambda de Wilks foi utilizado para inferência multivariada. Os efeitos fixos foram avaliados por testes de Wald, e os efeitos aleatórios foram examinados por meio da decomposição dos componentes de variância.

4. RESULTADOS

4.1 Reorganização das normas multinutrientes com a expansão composicional

A expansão progressiva do conjunto composicional de diagnose nutricional para incluir Cl, Na e Al resultou em deslocamentos sistemáticos das médias de todas as variáveis multinutrientes em relação a configuração tradicional do CND (Tabelas 3 e 4). Em contraste, as alterações nas variâncias foram limitadas e dependentes da configuração, indicando que a expansão do espaço composicional promoveu principalmente o deslocamento da posição da referência normativa, e não um aumento generalizado da dispersão diagnóstica.

Além dos deslocamentos na tendência central, a resposta das normas multinutrientes à expansão composicional revelou diferenças marcantes entre os nutrientes quanto à sensibilidade às mudanças de dimensionalidade. Essa sensibilidade diferencial pode ser compreendida a partir de duas fontes complementares de variabilidade, diretamente derivadas das estatísticas normativas: (i) a dispersão relativa de cada variável multinutriente dentro de um dado conjunto de nutrientes, expressa pelo coeficiente de variação, e (ii) a variabilidade dos parâmetros normativos entre diferentes configurações de nutrientes.

A dispersão relativa dentro de cada conjunto de nutrientes fornece uma medida direta da precisão da referência normativa. Variáveis multinutrientes como N, B, Cu e Zn apresentaram coeficientes de variação baixas em todas as configurações composicionais, indicando normas precisas e estáveis, com reduzida sensibilidade à expansão dimensional. Em contraste, P, K, Ca, Mg, S, Fe e Mn exibiram maior dispersão relativa, refletindo normas menos precisas e maior suscetibilidade a mudanças no arcabouço composicional. Para variáveis com médias negativas por construção (B, Cu, Fe, Mn e Zn), a dispersão relativa foi avaliada utilizando o coeficiente de variação absoluto ($|s/\bar{y}|$), uma vez que o sinal da média não afeta a interpretação da precisão normativa.

Tabela 3. Valores de referência (normas) das variáveis multinutrientes e da média geométrica da composição nutricional da folha.

Variável	Medida Tradicional	+Cl	+Na	+Al	+Cl+Na	+Na+Al	+Cl+Al	+Cl+Na+Al	Variabilidade (%)	
VN	\bar{y}	3,273	3,111	3,482	3,425	3,316	3,608	3,264	3,445	4,601
	s	0,101	0,099	0,098	0,116	0,098	0,111	0,113	0,109	6,966
	CV(%)	3,099	3,183	2,816	3,392	2,951	3,074	3,448	3,173	6,676
VP	\bar{y}	0,537	0,375	0,745	0,689	0,580	0,871	0,527	0,709	24,612
	s	0,084	0,083	0,080	0,102	0,081	0,096	0,099	0,096	10,081
	CV(%)	15,600	22,094	10,673	14,826	14,013	11,010	18,850	13,486	25,507
VK	\bar{y}	2,427	2,265	2,635	2,578	2,470	2,761	2,417	2,598	6,148
	s	0,175	0,168	0,165	0,189	0,160	0,178	0,182	0,173	5,461
	CV(%)	7,222	7,433	6,252	7,338	6,474	6,456	7,524	6,650	7,386
VCa	\bar{y}	1,988	1,826	2,197	2,140	2,031	2,323	1,979	2,160	7,443
	s	0,126	0,125	0,125	0,128	0,125	0,125	0,126	0,125	0,812
	CV(%)	6,344	6,837	5,678	5,964	6,159	5,375	6,354	5,771	7,607
VMg	\bar{y}	0,872	0,710	1,081	1,024	0,915	1,207	0,863	1,044	16,055
	s	0,211	0,219	0,221	0,214	0,228	0,222	0,220	0,228	2,662
	CV(%)	24,238	30,782	20,480	20,854	24,896	18,377	25,465	21,796	16,540
VS	\bar{y}	0,653	0,491	0,861	0,804	0,696	0,987	0,643	0,824	20,793
	s	0,076	0,075	0,070	0,092	0,071	0,084	0,089	0,083	10,171
	CV(%)	11,669	15,252	8,074	11,395	10,252	8,462	13,798	10,101	22,213
VB	\bar{y}	-4,358	-4,520	-4,149	-4,206	-4,315	-4,023	-4,367	-4,186	3,630
	s	0,124	0,126	0,126	0,131	0,129	0,131	0,132	0,133	2,768
	CV(%)	2,839	2,785	3,027	3,125	2,988	3,263	3,027	3,186	5,372
VCu	\bar{y}	-4,967	-5,129	-4,759	-4,815	-4,924	-4,632	-4,976	-4,795	3,177
	s	0,118	0,118	0,113	0,130	0,115	0,124	0,128	0,124	4,983
	CV(%)	2,382	2,293	2,385	2,698	2,331	2,669	2,571	2,577	6,378
VFe	\bar{y}	-1,890	-2,052	-1,682	-1,738	-1,847	-1,556	-1,899	-1,718	8,614
	s	0,208	0,210	0,212	0,180	0,214	0,186	0,184	0,190	7,240
	CV(%)	10,991	10,212	12,620	10,359	11,610	11,957	9,670	11,047	8,838
VMn	\bar{y}	-1,402	-1,564	-1,194	-1,250	-1,359	-1,067	-1,411	-1,230	11,824
	s	0,339	0,341	0,347	0,338	0,350	0,345	0,340	0,347	1,328
	CV(%)	24,166	21,823	29,110	27,009	25,730	32,347	24,078	28,233	12,568
VZn	\bar{y}	-4,044	-4,206	-3,836	-3,892	-4,001	-3,710	-4,054	-3,872	3,919
	s	0,143	0,151	0,157	0,149	0,164	0,160	0,155	0,166	5,003
	CV(%)	3,539	3,593	4,096	3,834	4,103	4,321	3,836	4,291	7,541
G	\bar{y}	0,953	1,119	0,773	0,820	0,911	0,682	0,962	0,802	15,572
	s	0,095	0,103	0,068	0,092	0,076	0,068	0,100	0,076	16,748
	CV(%)	9,933	9,208	8,818	11,210	8,368	10,036	10,416	9,487	9,399

Tabela 4. Comparações estatísticas dos valores de referência das variáveis multinutrientes (Vnut) e da média geométrica da composição nutricional foliar (G) entre o conjunto tradicional de nutrientes e os conjuntos expandidos pela inclusão de Cl, Na e Al. Os valores apresentados acima da barra correspondem às comparações entre as médias, enquanto os valores abaixo da barra correspondem às comparações entre as variâncias.

Variável	Trad vs +Cl	Trad vs +Na	Trad vs +Al	Trad vs			
				+Cl+Na	+Na+Al	+Cl+Al	+Cl+Na+Al
média/variância							
VN	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns
VP	* / ns	* / ns	* / *	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns
VK	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns
VCa	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns
VMg	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns
VS	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns
VB	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns
VCu	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns
VFe	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns
VMn	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	ns / ns	* / ns
VZn	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns	* / ns
G	* / ns	* / *	* / ns	* / *	* / *	* / ns	* / *

De forma complementar, a variabilidade dos parâmetros normativos entre configurações de nutrientes evidenciou a dependência estrutural de vários nutrientes em relação à dimensionalidade do espaço composicional. Nutrientes que apresentaram maior variabilidade inter-conjuntos de médias, desvios-padrão e coeficientes de variação foram identificados como mais sensíveis à expansão composicional, enquanto aqueles com baixa variabilidade inter-conjuntos demonstraram maior robustez de suas normas frente às mudanças no conjunto de elementos incluídos.

De maneira consistente, a média geométrica do sistema composicional (G) apresentou deslocamentos significativos de sua média em todas as configurações composicionais expandidas, indicando deslocamento do centro composicional (Tabela 3). A variância de G, contudo, diferiu apenas em contrastes específicos, sugerindo que, embora a posição da referência composicional se altere sistematicamente com a configuração, sua dispersão interna é apenas moderadamente afetada e depende dos elementos incluídos.

Em conjunto, esses resultados demonstram que a expansão do espaço composicional de diagnose reorganiza as normas multinutrientes por meio de uma combinação de deslocamentos da tendência central e diferenças nutriente-específicas de precisão normativa e sensibilidade

estrutural. Essa reorganização fornece a base estatística para o comportamento diagnóstico e a reestruturação multivariada examinados nas seções subsequentes.

4.2 Concordância diagnóstica e reorganização estrutural do espaço composicional

A análise da concordância diagnóstica entre o sistema composicional tradicional (conjunto de nutrientes 11) e os sistemas expandidos (até conjunto de nutrientes 14) mostrou que os efeitos observados na diagnose nutricional da palma de óleo dependem fundamentalmente do referencial composicional adotado e do conjunto de elementos considerados no espaço multinutriente. Antes de se manifestarem em mudanças de classe diagnóstica específicas, essas alterações refletem uma reorganização estrutural do espaço composicional, cuja magnitude e direção são condicionadas pelos esquemas de inclusão ou exclusão avaliados.

4.2.1 Conjunto de nutrientes tradicional (11) como referência: efeitos das inclusões

Quando o conjunto de nutrientes, composto exclusivamente pelos 11 nutrientes tradicionalmente considerados na diagnose nutricional da palma de óleo, é adotado como referência, observa-se que a inclusão isolada de Cl promove reduções expressivas na concordância diagnóstica completa (Tabela 5). Esse efeito se intensifica quando Na e Al são incluídos conjuntamente na ausência de Cl, configurando o cenário de maior reorganização diagnóstica entre os esquemas de inclusão avaliados.

Em contraste, as inclusões isoladas de Na ou de Al preservam níveis mais elevados de concordância diagnóstica, indicando que a reorganização observada não decorre apenas da expansão dimensional da configuração, mas está fortemente condicionada à natureza do elemento incorporado e ao seu papel estrutural no espaço composicional.

Independentemente do esquema de inclusão, destacam-se como mais sensíveis à expansão composicional os nutrientes P, S e Cu, enquanto exibem maior estabilidade relativa em micronutrientes como Mn e Zn (Tabela 5). O padrão observado indica que a inclusão de novos componentes induz um deslocamento do referencial nutricional, com maior impacto sobre macronutrientes diretamente associados ao crescimento e ao balanço iônico.

Tabela 5. FDC geral entre o conjunto de nutrientes tradicional (n=11) e as configurações ampliadas com a inclusão de Cl, Na e Al

	Frequência de Diagnósticos Concordantes em relação ao método Tradicional (%)											Média Macro	Média Micro
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn		
	Faixa análoga à Faixa análoga à Beaufils												
	9,6												
Cl	85,96	16,67	26,32	19,74	33,77	13,60	26,32	5	33,33	54,82	70,18	32,68	38,86
Na	77,19	78,51	91,67	84,65	92,98	77,19	87,72	79,39	88,60	96,05	89,47	83,70	88,25
Al	73,25	75,00	85,96	75,00	87,72	75,44	81,14	74,56	89,47	89,47	81,14	78,73	83,16
ClNa	67,54	38,16	70,18	57,02	66,23	43,42	55,70	42,11	71,93	82,02	85,53	57,09	67,46
ClAl	72,37	73,68	87,28	78,51	86,40	75,88	80,26	73,68	89,47	88,60	82,46	79,02	82,89
NaAl	11,40	9,21	17,54	10,53	36,40	14,47	13,16	16,23	24,56	52,63	25,88	16,59	26,49
ClNaAl	63,60	71,93	83,33	73,68	88,16	68,86	78,51	67,98	84,21	88,60	84,21	74,93	80,70
	PRA												
Cl	57,89	28,07	65,35	53,95	67,54	18,42	57,02	50,88	72,81	57,46	76,75	48,54	62,98
Na	85,09	85,53	90,79	88,60	91,23	84,65	91,67	87,28	92,54	89,04	93,42	87,65	90,79
Al	83,33	83,77	92,54	81,58	91,23	82,46	88,16	85,09	85,96	93,42	87,72	85,82	88,07
ClNa	71,05	57,02	75,88	69,30	79,39	58,77	73,68	63,16	80,26	83,77	86,84	68,57	77,54
ClAl	82,02	85,09	91,67	82,46	92,11	82,89	88,16	82,02	85,96	93,86	90,79	86,04	88,16
NaAl	34,21	21,49	59,21	42,11	75,00	20,61	46,49	39,47	58,77	63,60	62,28	42,11	54,12
ClNaAl	78,51	79,39	87,72	79,82	88,60	78,51	87,72	80,26	87,28	90,35	89,04	82,09	86,93

4.2.2 Influência do critério diagnóstico sob o conjunto de nutrientes tradicional (11)

A comparação entre faixas análogas a Beaufils e referências internas específicas por talhão (PRA) mostra que o critério diagnóstico modula a magnitude da concordância geral, sem alterar o padrão estrutural induzido pelas inclusões (Tabela 5). Enquanto faixas fixas tendem a amplificar as perdas de concordância nos esquemas estruturalmente mais críticos como aqueles associados à inclusão isolada de Cl ou à inclusão conjunta de Na e Al na configuração tradicional, o PRA reduz o impacto do deslocamento geral do referencial nutricional ao avaliar cada nutriente em relação ao próprio talhão, preservando maior coerência diagnóstica relativa.

Ainda assim, mesmo sob PRA, os esquemas que envolvem Cl, isoladamente ou em combinação com Na e Al, continuam a se destacar como o mais perturbador, isto é, aqueles que promovem as maiores reorganizações na posição relativa dos nutrientes no espaço composicional, indicando que a resposta à inclusão não se restringe a um efeito do critério diagnóstico adotado.

4.2.3 Conjunto de nutrientes completo (14) como referência: efeitos das exclusões

A adoção do conjunto completo (com Cl, Na e Al) como referência diagnóstica permite uma leitura complementar dos resultados, agora sob a ótica da exclusão de componentes de um espaço composicional completo. Nessa condição, observa-se que a exclusão isolada de Cl resulta em reduções expressivas da concordância diagnóstica, enquanto a exclusão isolada de Na ou de Al preserva níveis elevados de concordância (Tabela 6).

Esse comportamento evidencia que, no espaço composicional expandido, Cl exerce papel estruturante, contribuindo para a estabilidade da interpretação dos nutrientes tradicionais. A exclusão conjunta de Na e Al também promove reduções relevantes de concordância, reforçando que os efeitos desses elementos se tornam mais pronunciados quando considerados de forma combinada.

Tabela 6. Frequência de Diagnósticos Concordantes (%) entre o conjunto de nutrientes com ClNaAl (n=14) em relação a exclusão de Cl, Na e Al

Exclusão de	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Média Macro	Média Micro
Faixa análoga à Beaufile													
Cl	14,47	11,84	24,56	17,11	35,96	20,18	17,11	22,81	29,82	60,96	30,26	20,69	32,19
Na	85,96	85,09	95,18	88,16	96,49	82,89	89,04	85,09	87,72	96,49	92,98	88,96	90,26
Al	75,88	52,63	79,39	72,37	71,05	60,53	70,18	60,96	85,09	89,04	85,53	68,64	78,16
Cl, Na	76,32	75,00	86,84	80,70	91,67	74,12	81,14	76,32	83,33	93,86	87,28	80,77	84,39
Cl, Al	73,25	78,51	86,40	79,82	88,16	76,75	85,53	71,49	90,35	90,79	87,72	80,48	85,18
Na, Al	69,74	12,72	23,25	13,60	29,82	11,40	20,18	8	27,63	46,49	68,86	26,75	33,95
Cl, Na, Al	63,60	71,93	83,33	73,68	88,16	68,86	78,51	67,98	84,21	88,60	84,21	74,93	80,70
PRA													
Cl	47,81	33,77	64,04	53,51	77,63	25,88	52,19	49,56	65,79	67,11	67,98	50,44	60,53
Na	90,79	92,54	93,42	90,35	94,74	90,79	96,05	89,91	94,30	93,86	91,23	92,11	93,07
Al	80,26	67,98	79,39	80,26	86,40	70,61	79,82	71,49	84,65	91,23	87,72	77,49	82,98
Cl, Na	85,09	85,96	86,40	84,21	92,11	82,89	89,47	84,65	90,35	91,67	88,16	86,11	88,86
Cl, Al	89,47	83,33	90,79	84,65	91,23	85,09	93,42	82,02	87,72	90,79	93,86	87,43	89,56
Na, Al	62,72	19,30	57,46	43,86	61,84	15,79	51,75	40,35	63,60	54,39	71,93	43,49	56,40
Cl, Na, Al	78,51	79,39	87,72	79,82	88,60	78,51	87,72	80,26	87,28	90,35	89,04	82,09	86,93

4.2.4 Critério diagnóstico e estabilidade sob o conjunto de nutrientes completo (14)

Sob a configuração completa (14), o uso de PRA resulta no cenário de maior estabilidade diagnóstica entre todas as configurações analisadas (Tabela 6). Mesmo a exclusão de Cl conduz a concordâncias mais elevadas do que aquelas observadas sob faixas fixas, embora reduções ainda sejam detectáveis nos esquemas estruturalmente mais críticos. A combinação entre um espaço composicional completo e um critério diagnóstico relativo (o do PRA) maximiza, assim, a robustez do diagnóstico multinutriente.

4.2.5 Inclusões versus exclusões

A análise conjunta dos resultados obtidos a partir das inclusões no conjunto de nutrientes tradicional (11) (Tabela 5) e das exclusões no conjunto de nutrientes completo (14) (Tabela 6) revela uma simetria conceitual consistente. A inclusão isolada de Cl em um espaço originalmente incompleto produz reorganizações diagnósticas de magnitude comparável às observadas quando Cl é excluído de um espaço composicional completo. De forma análoga, Na e Al exibem efeitos limitados quando incluídos ou excluídos isoladamente, mas reorganizações substanciais quando considerados conjuntamente.

Embora a análise apresentada revele de forma clara a reorganização estrutural do diagnóstico induzida pelas inclusões e exclusões de Cl, Na e Al, a relevância agrônômica dessas alterações depende de como elas se traduzem em mudanças de classe diagnóstica funcional, especialmente nas classes associadas à limitação por falta, suficiência e excesso. Essa tradução funcional é analisada na sequência, com base na concordância por classe diagnóstica.

4.3 Implicações Agrônômicas da reorganização diagnóstica induzida por Cl, Na e Al

A relevância das reorganizações diagnósticas associadas à inclusão ou exclusão de Cl, Na e Al não reside apenas na magnitude das perdas de concordância global, mas, sobretudo, na forma como essas reorganizações se traduzem em mudanças funcionais de classe diagnóstica, com impacto direto sobre a interpretação do estado nutricional e sobre a tomada de decisão em manejo da adubação do dendezeiro.

Enquanto a análise de concordância geral evidencia a resposta estrutural do sistema diagnóstico (Tabelas 5 e 6), a análise por classe permite identificar quais transições diagnósticas

são induzidas, se essas transições ocorrem predominantemente no domínio da suficiência ou se implicam deslocamentos entre estados de limitação por falta, suficiência e limitação por excesso.

4.3.1 Estrutura funcional das classes diagnósticas

No sistema de faixas análogas a Beaufile, a classe Normal (-0,66 a +0,66) constitui a única classe central e apresenta largura dupla em relação às classes adjacentes. De um lado as classes Deficiente e Abaixo do normal representam situações de limitação por falta, enquanto, e do outro as classes Acima do normal e Excessivo representam situações de limitação por excesso.

Essa assimetria funcional implica que mudanças de classe envolvendo a região central possuem significado agrônômico distinto de mudanças que ocorrem inteiramente dentro do domínio de suficiência ou de limitação. Assim, a análise da concordância por classe permite distinguir reorganizações diagnósticas funcionalmente relevantes daquelas que, embora estatisticamente detectáveis, possuem menor impacto prático.

4.3.2 Conjunto de nutrientes tradicional como referência: implicações agrônômicas das inclusões

Quando a configuração de nutrientes tradicional é adotado como referência, a inclusão de CI resulta em alterações expressivas na distribuição das classes diagnósticas, particularmente sob faixas fixas. Observa-se aumento na frequência de transições envolvendo a classe Normal e as classes associadas à limitação por falta ou por excesso, indicando que a reorganização estrutural evidenciada na análise geral (Tabela 5) se traduz, na prática, em mudanças funcionais na interpretação do estado nutricional (Tabela 7).

Tabela 7. Frequência Relativa de talhões com diagnósticos concordantes (FDC) para as faixas “Beaufils” pela utilização de normas de cada combinação *versus* normas tradicionais, para os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B em povoamentos palma de óleo do Estado do Pará.

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	Inclusão de										
	Cl										
Classe											
DEF < -1,33	90,48	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
AB. NOR -1,33 a -0,66	77,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,33	46,43
NORMAL -0,66 a +0,66	87,95	0,00	28,87	11,76	48,80	0,00	7,69	3,70	33,02	73,33	73,00
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	81,82	2,94	0,00	0,00	0,00	3,23	0,00	0,00	0,00	31,25	31,58
EXCESSIVO \geq + 1,33	95,24	0,00	35,29	6,25	12,00	0,00	17,39	14,81	52,63	26,83	100,00
	Inclusão de										
	Na										
DEF < -1,33	78,57	83,78	92,31	90,63	76,92	90,00	81,63	85,71	80,65	84,00	76,92
AB. NOR -1,33 a -0,66	71,43	64,29	86,27	67,57	87,50	55,56	77,14	66,67	85,71	91,67	75,00
NORMAL -0,66 a +0,66	81,93	80,41	91,75	90,20	93,60	81,82	93,41	83,33	95,28	97,78	98,00
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	63,64	76,47	94,59	75,61	94,74	67,74	90,00	70,91	62,50	97,92	89,47
EXCESSIVO \geq + 1,33	90,48	94,44	100,00	100,00	96,00	84,38	91,30	88,89	94,74	100,00	86,11
	Inclusão de										
	Al										
DEF < -1,33	80,95	72,97	80,77	81,25	92,31	66,67	83,67	57,14	83,87	76,00	92,31
AB. NOR -1,33 a -0,66	55,10	59,52	78,43	62,16	75,00	52,78	62,86	70,83	85,71	79,17	60,71
NORMAL -0,66 a +0,66	85,54	85,57	91,75	80,39	89,60	86,87	86,81	74,07	92,45	93,33	82,00
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	57,58	67,65	83,78	60,98	85,96	61,29	76,67	76,36	87,50	87,50	76,32
EXCESSIVO \geq + 1,33	76,19	72,22	88,24	93,75	84,00	87,50	86,96	85,19	94,74	97,56	91,67
	Inclusão de										
	CINa										
DEF < -1,33	64,29	35,14	50,00	59,38	69,23	30,00	51,02	21,43	58,06	60,00	76,92
AB. NOR -1,33 a -0,66	61,22	11,90	43,14	37,84	12,50	16,67	28,57	12,50	53,57	75,00	67,86

NORMAL -0,66 a +0,66	71,08	43,30	79,38	63,73	71,20	51,52	63,74	43,52	83,96	87,78	95,00
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	60,61	26,47	83,78	39,02	47,37	3,23	36,67	29,09	50,00	70,83	81,58
EXCESSIVO $\geq + 1,33$	85,71	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	83,33

**Inclusão de
CIAI**

DEF < -1,33	73,81	72,97	88,46	84,38	76,92	66,67	77,55	42,86	80,65	76,00	80,77
AB. NOR -1,33 a -0,66	59,18	61,90	74,51	70,27	75,00	47,22	65,71	50,00	80,36	79,17	67,86
NORMAL -0,66 a +0,66	79,52	82,47	90,72	83,33	88,80	85,86	86,81	79,63	94,34	91,11	85,00
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	63,64	64,71	89,19	63,41	91,23	67,74	80,00	76,36	93,75	87,50	78,95
EXCESSIVO $\geq + 1,33$	85,71	72,22	100,00	93,75	72,00	93,75	82,61	81,48	100,00	97,56	91,67

**Inclusão de
NaAl**

DEF < -1,33	7,14	5,41	7,69	9,38	46,15	3,33	8,16	7,14	0,00	36,00	23,08
AB. NOR -1,33 a -0,66	0,00	0,00	1,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,67	0,00
NORMAL -0,66 a +0,66	2,41	1,03	20,62	4,90	39,20	0,00	3,30	8,33	33,96	58,89	17,00
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	5,26	0,00	0,00	0,00	6,25	27,08	0,00
EXCESSIVO $\geq + 1,33$	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

**Inclusão de
CINaAl**

DEF < -1,33	64,29	75,68	88,46	71,88	76,92	70,00	73,47	35,71	70,97	72,00	76,92
AB. NOR -1,33 a -0,66	44,90	64,29	66,67	70,27	75,00	36,11	65,71	58,33	76,79	75,00	67,86
NORMAL -0,66 a +0,66	68,67	74,23	88,66	80,39	91,20	81,82	87,91	75,00	91,51	91,11	88,00
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	60,61	61,76	81,08	53,66	89,47	48,39	70,00	58,18	68,75	89,58	81,58
EXCESSIVO $\geq + 1,33$	90,48	88,89	100,00	93,75	80,00	84,38	82,61	85,19	100,00	100,00	94,44

Esse comportamento é ainda mais pronunciado quando Na e Al são incluídos conjuntamente na ausência de Cl, situação em que se intensificam as migrações diagnósticas envolvendo nutrientes como N, P, K e Ca, refletindo um cenário de elevada instabilidade funcional. Nessas condições, a diagnose tende a oscilar entre estados de limitação e suficiência, o que compromete a consistência da recomendação agronômica quando baseada exclusivamente em faixas fixas (Tabela 7).

Sob PRA, mantendo-se o referencial composicional, a frequência dessas transições funcionais é substancialmente reduzida (Tabela 8). A interpretação relativa por talhão atenua mudanças abruptas entre domínios funcionais, preservando maior coerência agronômica, embora os esquemas que envolvem Cl continuem a se destacar como aqueles que promovem as maiores reorganizações diagnósticas.

Tabela 8. Frequência de talhões com diagnósticos concordantes (FDC) para as classes de PRA, pela utilização de normas de cada combinação *versus* normas tradicionais, para os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B em povoamentos palma de óleo do Estado do Pará.

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Classe	Inclusão de Cl										
P (positiva)	4,17	100,00	40,00	73,53	80,00	100,00	79,49	85,71	36,00	38,10	65,00
PZ (positiva a nula)	18,37	51,92	95,65	76,19	100,00	35,48	94,12	75,00	91,67	81,25	83,33
Z (nula)	95,61	18,75	76,56	60,90	91,89	9,68	56,36	66,42	81,25	93,86	89,43
NZ (negativa a nula)	7,69	0,00	3,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,33
N (negativa)	73,33	0,00	0,00	7,14	13,04	0,00	27,78	4,76	52,94	6,98	100,00
	Inclusão de Na										
P (positiva)	91,67	100,00	100,00	91,18	100,00	94,74	89,74	100,00	96,00	90,48	85,00
PZ (positiva a nula)	67,35	76,92	73,91	71,43	57,14	61,29	76,47	75,00	72,92	68,75	79,17
Z (nula)	88,60	88,28	96,09	91,73	93,92	90,32	97,27	86,86	97,66	96,49	96,75
NZ (negativa a nula)	92,31	80,77	85,71	88,46	92,50	68,97	92,59	87,18	100,00	88,24	93,33
N (negativa)	93,33	88,89	100,00	78,57	78,26	96,00	88,89	100,00	100,00	76,74	96,77
	Inclusão de Al										
P (positiva)	87,50	61,54	73,33	85,29	80,00	78,95	92,31	100,00	100,00	100,00	90,00
PZ (positiva a nula)	61,22	78,85	84,78	66,67	100,00	61,29	73,53	83,33	54,17	75,00	79,17
Z (nula)	89,47	89,06	98,44	83,46	90,54	90,32	91,82	87,59	93,75	95,61	86,18
NZ (negativa a nula)	88,46	80,77	92,86	73,08	92,50	75,86	77,78	79,49	80,00	82,35	90,00
N (negativa)	93,33	77,78	81,82	92,86	95,65	80,00	100,00	76,19	100,00	100,00	96,77
	Inclusão de CINA										
P (positiva)	91,67	69,23	73,33	61,76	80,00	36,84	74,36	28,57	76,00	85,71	90,00
PZ (positiva a nula)	32,65	21,15	32,61	28,57	28,57	22,58	20,59	25,00	35,42	43,75	62,50
Z (nula)	85,09	63,28	88,28	75,19	81,08	66,13	82,73	63,50	94,53	91,23	98,37
NZ (negativa a nula)	84,62	80,77	89,29	76,92	87,50	44,83	88,89	74,36	100,00	91,18	93,33
N (negativa)	33,33	88,89	81,82	78,57	69,57	100,00	94,44	95,24	94,12	72,09	51,61
	Inclusão de CIAI										

P (positiva)	83,33	69,23	86,67	85,29	80,00	78,95	89,74	85,71	96,00	100,00	90,00
PZ (positiva a nula)	61,22	78,85	82,61	61,90	85,71	67,74	67,65	66,67	52,08	75,00	79,17
Z (nula)	86,84	88,28	95,31	83,46	93,24	87,90	92,73	86,13	95,31	95,61	91,87
NZ (negativa a nula)	92,31	92,31	92,86	84,62	90,00	72,41	88,89	76,92	80,00	88,24	93,33
N (negativa)	93,33	77,78	90,91	92,86	95,65	92,00	94,44	80,95	100,00	97,67	93,55
Inclusão de NaAl											
P (positiva)	12,50	7,69	0,00	11,76	40,00	5,26	17,95	14,29	0,00	19,05	20,00
PZ (positiva a nula)	0,00	0,00	0,00	0,00	14,29	0,00	0,00	0,00	0,00	6,25	0,00
Z (nula)	38,60	15,63	78,91	48,87	82,43	9,68	54,55	30,66	85,94	92,11	73,17
NZ (negativa a nula)	80,77	80,77	100,00	65,38	90,00	31,03	88,89	71,79	80,00	67,65	100,00
N (negativa)	66,67	77,78	54,55	71,43	34,78	100,00	83,33	90,48	94,12	27,91	58,06
Inclusão de ClNaAl											
P (positiva)	83,33	69,23	100,00	82,35	80,00	78,95	87,18	85,71	88,00	95,24	85,00
PZ (positiva a nula)	55,10	71,15	71,74	47,62	85,71	54,84	64,71	54,17	56,25	62,50	66,67
Z (nula)	85,09	81,25	92,19	81,95	91,22	83,06	95,45	80,29	96,88	95,61	95,12
NZ (negativa a nula)	80,77	92,31	85,71	80,77	90,00	68,97	85,19	87,18	90,00	88,24	90,00
N (negativa)	93,33	77,78	90,91	100,00	73,91	96,00	88,89	95,24	100,00	86,05	83,87

4.3.3 Conjunto de nutrientes completo como referência: implicações agronômicas das exclusões

Quando o conjunto de nutrientes completo (14) é adotado como referência, observa-se maior estabilidade funcional das classes diagnósticas (Tabelas 8 e 9), particularmente sob PRA. A exclusão isolada de Na ou de Al resulta em alterações limitadas na distribuição das classes, com manutenção da maior parte dos diagnósticos no domínio funcional original.

Em contraste, a exclusão de Cl promove aumento na frequência de transições diagnósticas envolvendo a classe Normal e classes de limitação, particularmente para N, P e K, refletindo a perda de um componente estrutural do espaço composicional (Tabela 9 e 10). Esse comportamento indica que a remoção de Cl afeta diretamente a interpretação funcional do estado nutricional, mesmo quando o diagnóstico é realizado por referência interna.

Tabela 9. Frequência Relativa de talhões com diagnósticos concordantes (FDC) para as faixas análogas a Beaufils de normas com ClNaAl (conjunto 14) *versus* a exclusão de cada combinação, para os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B em povoamentos palma de óleo do Estado do Pará.

Classe	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	FDC (%) pela Exclusão de Cl										
DEF < -1,33	11,11	7,14	7,41	12,50	60,00	4,17	10,81	12,50	0,00	50,00	30,00
AB. NOR -1,33 a -0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,46	0,00
NORMAL -0,66 a +0,66	1,15	0,00	31,68	5,21	42,37	0,00	7,53	7,69	41,44	64,44	23,47
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	3,03	0,00	0,00	0,00	0,00	36,00	0,00
EXCESSIVO \geq + 1,33	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
FDC (%) pela Exclusão de Na											
DEF < -1,33	96,30	96,43	96,30	95,83	100,00	87,50	94,59	62,50	100,00	100,00	100,00
AB. NOR -1,33 a -0,66	73,33	84,62	97,37	73,68	100,00	82,61	80,00	77,78	83,33	96,15	85,19
NORMAL -0,66 a +0,66	88,51	92,47	95,05	93,75	97,46	90,38	92,47	98,90	89,19	96,67	92,86
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	85,00	69,77	95,00	87,18	98,48	62,50	88,57	84,48	72,22	94,00	93,02
EXCESSIVO \geq + 1,33	89,66	72,00	90,91	83,87	83,33	77,78	82,14	65,91	90,91	97,73	95,00
FDC (%) pela Exclusão de Al											
DEF < -1,33	77,78	46,43	48,15	75,00	80,00	37,50	67,57	50,00	78,26	77,78	100,00
AB. NOR -1,33 a -0,66	68,89	28,21	57,89	50,00	40,00	43,48	54,29	33,33	72,22	88,46	81,48
NORMAL -0,66 a +0,66	75,86	59,14	88,12	73,96	77,12	65,38	74,19	53,85	90,99	92,22	93,88
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	75,00	37,21	92,50	69,23	53,03	18,75	57,14	58,62	77,78	78,00	69,77
EXCESSIVO \geq + 1,33	86,21	100,00	90,91	96,77	100,00	100,00	96,43	97,73	100,00	100,00	77,50
Exclusão de Cl, Na											
DEF < -1,33	96,30	92,86	88,89	91,67	100,00	79,17	94,59	50,00	100,00	100,00	100,00
AB. NOR -1,33 a -0,66	57,78	74,36	89,47	65,79	70,00	73,91	65,71	74,07	81,48	88,46	66,67
NORMAL -0,66 a +0,66	86,21	86,02	88,12	88,54	95,76	85,58	89,25	87,91	83,78	95,56	88,78
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	62,50	51,16	82,50	74,36	87,88	43,75	68,57	75,86	61,11	90,00	86,05
EXCESSIVO \geq + 1,33	75,86	56,00	81,82	74,19	87,50	66,67	71,43	59,09	86,36	95,45	92,50
Exclusão de Cl, Al											

DEF < -1,33	88,89	92,86	85,19	100,00	80,00	87,50	97,30	87,50	95,65	100,00	100,00
AB. NOR -1,33 a -0,66	64,44	71,79	89,47	63,16	80,00	43,48	80,00	59,26	90,74	84,62	85,19
NORMAL -0,66 a +0,66	75,86	86,02	87,13	89,58	95,76	82,69	89,25	86,81	92,79	91,11	94,90
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	60,00	62,79	85,00	66,67	80,30	78,13	74,29	56,90	61,11	86,00	74,42
EXCESSIVO $\geq + 1,33$	82,76	72,00	81,82	70,97	79,17	73,33	78,57	63,64	95,45	95,45	80,00
Exclusão de Na, Al											
DEF < -1,33	88,89	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
AB. NOR -1,33 a -0,66	48,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,38	25,93
NORMAL -0,66 a +0,66	73,56	0,00	19,80	6,25	44,92	0,96	5,38	3,30	27,03	67,78	72,45
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	65,00	2,33	0,00	0,00	3,03	3,13	0,00	0,00	0,00	24,00	44,19
EXCESSIVO $\geq + 1,33$	79,31	0,00	27,27	3,23	12,50	0,00	14,29	9,09	45,45	25,00	100,00
Exclusão de Cl, Na, Al											
DEF < -1,33	64,29	75,68	88,46	71,88	76,92	70,00	73,47	35,71	70,97	72,00	76,92
AB. NOR -1,33 a -0,66	44,90	64,29	66,67	70,27	75,00	36,11	65,71	58,33	76,79	75,00	67,86
NORMAL -0,66 a +0,66	68,67	74,23	88,66	80,39	91,20	81,82	87,91	75,00	91,51	91,11	88,00
AC.NORMAL +0,66 a +1,33	60,61	61,76	81,08	53,66	89,47	48,39	70,00	58,18	68,75	89,58	81,58
EXCESSIVO $\geq + 1,33$	90,48	88,89	100,00	93,75	80,00	84,38	82,61	85,19	100,00	100,00	94,44

Tabela 10: Frequência de talhões com diagnósticos concordantes (FDC) para as classes de PRA, pela utilização de normas com ClNaAl (conjunto 14) *versus* a exclusão de cada combinação, para os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B em povoamentos palma de óleo do Estado do Pará.

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Classe de PRA	Exclusão de Cl										
P (positiva)	14,29	11,11	0,00	13,79	50,00	6,67	20,00	14,29	0,00	18,18	23,53
PZ (positiva a nula)	0,00	0,00	0,00	0,00	14,29	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00
Z (nula)	53,28	23,97	84,92	58,54	85,00	12,30	59,17	38,71	89,05	92,31	76,34
NZ (negativa a nula)	81,08	87,23	97,06	84,62	81,82	37,84	89,66	80,00	91,67	68,29	94,59
N (negativa)	64,71	85,71	42,86	72,22	44,44	100,00	88,24	83,33	94,44	31,58	61,54
	Exclusão de Na										
P (positiva)	100,00	100,00	80,00	96,55	100,00	93,33	100,00	85,71	100,00	95,45	100,00
PZ (positiva a nula)	87,10	95,45	100,00	78,95	100,00	84,00	96,30	88,89	89,29	100,00	88,24
Z (nula)	91,80	95,04	97,62	94,31	99,29	94,26	95,83	98,39	95,62	95,73	90,84
NZ (negativa a nula)	89,19	80,85	85,29	87,18	81,82	81,08	93,10	78,18	75,00	80,49	83,78
N (negativa)	82,35	100,00	78,57	72,22	94,44	93,10	94,12	75,00	94,44	100,00	100,00
	Exclusão de Al										
P (positiva)	95,24	77,78	60,00	72,41	87,50	46,67	80,00	28,57	66,67	86,36	94,12
PZ (positiva a nula)	45,16	27,27	38,24	42,11	28,57	28,00	33,33	33,33	42,86	70,00	76,47
Z (nula)	92,62	75,21	92,86	85,37	87,86	75,41	85,00	72,58	95,62	94,02	94,66
NZ (negativa a nula)	83,78	80,85	85,29	87,18	90,91	70,27	89,66	78,18	100,00	97,56	83,78
N (negativa)	29,41	100,00	71,43	83,33	83,33	100,00	100,00	91,67	88,89	84,21	61,54
	Exclusão de Cl, Na										
P (positiva)	100,00	88,89	60,00	96,55	100,00	93,33	100,00	85,71	100,00	95,45	100,00
PZ (positiva a nula)	83,87	93,18	91,18	73,68	100,00	76,00	88,89	77,78	82,14	100,00	88,24
Z (nula)	87,70	90,91	96,03	88,62	95,00	90,98	90,00	91,94	90,51	94,87	85,50
NZ (negativa a nula)	70,27	63,83	70,59	71,79	81,82	62,16	72,41	76,36	75,00	70,73	83,78
N (negativa)	82,35	100,00	64,29	72,22	94,44	75,86	94,12	70,83	94,44	100,00	100,00
	Exclusão de Cl, Al										
P (positiva)	90,48	100,00	95,00	100,00	100,00	100,00	97,14	85,71	66,67	95,45	100,00

PZ (positiva a nula)	87,10	75,00	88,24	78,95	57,14	72,00	92,59	72,22	82,14	90,00	100,00
Z (nula)	91,80	90,08	95,24	91,06	97,14	90,98	92,50	86,29	94,16	94,02	94,66
NZ (negativa a nula)	86,49	68,09	73,53	61,54	81,82	59,46	89,66	69,09	75,00	82,93	81,08
N (negativa)	82,35	100,00	92,86	72,22	83,33	96,55	100,00	95,83	94,44	86,84	100,00
Exclusão de Na, Al											
P (positiva)	4,76	100,00	35,00	68,97	75,00	100,00	80,00	71,43	24,24	36,36	76,47
PZ (positiva a nula)	29,03	45,45	97,06	78,95	85,71	36,00	88,89	77,78	92,86	80,00	94,12
Z (nula)	97,54	12,40	70,63	52,03	90,00	9,84	50,83	58,06	74,45	90,60	83,21
NZ (negativa a nula)	5,41	0,00	5,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N (negativa)	70,59	0,00	0,00	5,56	16,67	0,00	29,41	4,17	50,00	5,26	100,00
Exclusão de Cl, Na, Al											
P (positiva)	95,24	100,00	75,00	96,55	100,00	100,00	97,14	85,71	66,67	90,91	100,00
PZ (positiva a nula)	87,10	84,09	97,06	52,63	85,71	68,00	81,48	72,22	96,43	100,00	94,12
Z (nula)	79,51	85,95	93,65	88,62	96,43	84,43	87,50	88,71	90,51	93,16	89,31
NZ (negativa a nula)	56,76	51,06	70,59	53,85	65,45	54,05	79,31	61,82	75,00	73,17	72,97
N (negativa)	82,35	100,00	71,43	77,78	94,44	82,76	94,12	83,33	94,44	97,37	100,00

4.3.4 Faixas fixas versus PRA: consequências para a tomada de decisão

A comparação entre faixas fixas (análogas a Beaufils) e referências internas específicas por talhão (PRA) evidencia implicações agronômicas claras quando se examinam as frequências de concordância por classe diagnóstica. Sob faixas fixas, as reorganizações diagnósticas associadas às inclusões ou exclusões estruturalmente mais críticas manifestam-se como reduções expressivas da concordância funcional (Tabela 7 e 9), enquanto sob PRA essas mesmas reorganizações tendem a ser substancialmente amortecidas (Tabela 8 e 10).

Inclusões sob o conjunto de nutrientes tradicional (11)

No caso da inclusão isolada de Cl, observa-se comportamento contrastante entre os nutrientes quando o diagnóstico é realizado por faixas fixas. Para N, as frequências de concordância permanecem elevadas em todas as classes diagnósticas, indicando relativa estabilidade funcional. Em contrapartida, para P, K, Ca, Mg e S, bem como para os micronutrientes B, Cu e Fe, registram-se frequências de concordância substancialmente reduzidas, frequentemente inferiores a 40–50%, evidenciando reorganizações amplas, e não meramente discretas, na interpretação funcional desses nutrientes (Tabela 7).

Quando se considera a inclusão conjunta de Na + Al, o padrão torna-se ainda mais generalizado, com reduções simultâneas de concordância envolvendo a maioria dos macronutrientes e micronutrientes, inclusive aqueles que exibem maior estabilidade sob a inclusão isolada de Cl. Esse comportamento indica que Na e Al, quando introduzidos conjuntamente, promovem uma reorganização sistêmica do espaço multinutriente, resultando em perdas amplas de concordância funcional sob faixas fixas (Tabela 8).

Sob PRA, tanto a inclusão isolada de Cl quanto a inclusão conjunta de Na + Al apresentam frequências de concordância por classe consistentemente mais elevadas, inclusive para os nutrientes mais sensíveis sob faixas fixas (Tabela 9). Nessas condições, as reorganizações induzidas manifestam-se predominantemente como ajustes graduais na posição relativa dos nutrientes, com redução acentuada das transições funcionais entre suficiência e limitação.

Exclusões sob o conjunto de nutrientes completo (14)

Sob a configuração completa 14 como referência, os efeitos agronômicos das exclusões apresentam padrão conceitualmente simétrico, embora não idêntico, àquele observado para as inclusões ao conjunto tradicional.

No caso da exclusão isolada de Cl, observam-se, sob faixas fixas, reduções expressivas de concordância por classe para diversos nutrientes tradicionais, com destaque para N, P, K, Ca e S, bem como para micronutrientes como Cu e B (Tabela 9). Essas reduções indicam que a retirada de Cl, enquanto componente estrutural do espaço composicional expandido, promove reorganizações funcionais amplas, resultando em migrações frequentes entre a classe Normal e classes associadas à limitação por falta ou por excesso.

No caso da exclusão conjunta de Na + Al, o padrão sob faixas fixas é novamente sistêmico, com reduções generalizadas de concordância envolvendo tanto macronutrientes quanto micronutrientes (Tabela 8). Embora Na e Al apresentem efeitos limitados quando excluídos isoladamente, sua remoção conjunta resulta em reorganização funcional ampla, refletindo a importância de suas interações no espaço multinutriente expandido.

Quando a análise é realizada sob PRA, mantendo o conjunto completo como referência, os efeitos das exclusões tornam-se substancialmente amortecidos, embora ainda detectáveis (Tabela 9). As frequências de concordância por classe permanecem elevadas para a maioria dos nutrientes, e as reorganizações observadas manifestam-se predominantemente como ajustes graduais na posição relativa, com redução expressiva das transições funcionais abruptas.

Síntese agronômica

Esse contraste indica que, enquanto sob faixas fixas os esquemas envolvendo Cl, isoladamente, ou Na + Al, em conjunto, resultam em reclassificações funcionais extensas, sob PRA essas mesmas reorganizações são amplamente amortecidas. Como consequência, a diagnose baseada em referências internas específicas por talhão apresenta maior robustez agronômica, ao reduzir a probabilidade de recomendações contrastantes em resposta a reorganizações estruturais do espaço composicional.

De forma coerente com a análise estrutural apresentada anteriormente, essa simetria entre inclusões e exclusões reforça que a robustez agronômica do diagnóstico depende menos do número de componentes considerados e mais da coerência entre o espaço composicional adotado e o critério diagnóstico empregado.

4.3.5 Assertividade diagnóstica e implicações para o manejo nutricional

Devido às reorganizações estruturais e funcionais mostradas, a assertividade do diagnóstico nutricional da palma de óleo depende fundamentalmente da coerência entre o espaço composicional adotado e a composição mineral efetivamente expressa na folha. Considerando que Cl, Na e Al integram essa composição, a interpretação do estado nutricional dos 11 nutrientes tradicionalmente considerados requer sua avaliação em um espaço composicional completo.

Nesse contexto, a adoção do conjunto completo (14), particularmente quando associada a referências internas específicas por talhão (PRA), estabelece um referencial diagnóstico no qual as variações observadas refletem predominantemente alterações reais no balanço multinutriente, e não efeitos colaterais associados à incompletude do espaço composicional ou à rigidez do critério diagnóstico. Essa abordagem reduz a probabilidade de reclassificações funcionais artificiais e fornece uma base mais consistente e fisiologicamente interpretável para a tomada de decisão em fertilização e manejo nutricional.

Esses resultados demonstram que faixas fixas são particularmente sensíveis a reorganizações do espaço composicional, resultando em mudanças frequentes de classe diagnóstica quando novos componentes são incluídos ou excluídos. Em contraste, estratégias diagnósticas baseadas em referências internas específicas por talhão tendem a preservar a coerência relativa do diagnóstico, ao interpretar cada nutriente em relação ao próprio sistema produtivo.

Em ambos os casos, a expansão do espaço composicional não se limita a um efeito classificatório, mas implica uma redefinição do referencial nutricional subjacente. Esse deslocamento sistemático sugere a atuação de um mecanismo fisiológico integrador, associado ao balanço iônico da planta, cuja análise permite compreender por que determinados elementos em especial o cloro exerce papel estrutural na reorganização do diagnóstico multinutriente.

4.4 Balanço iônico

As análises de regressão baseadas na população diagnosticada (Q1–Q3) indicam que a inclusão de cloro promove um reancoramento estrutural do sistema de balanço iônico em relação ao arcabouço tradicional, aqui entendido como a redefinição do estado eletroquímico de referência do sistema nutricional. Esse comportamento é caracterizado por interceptos

significativamente negativos ($B_0 < 0$), combinados com declividades significativamente maiores que a unidade ($B_1 > 1$), indicando simultaneamente uma mudança do referencial eletroquímico e uma alteração na sensibilidade estrutural das relações de balanço iônico. Esses resultados demonstram que o cloro induz uma reorganização da estrutura eletroquímica subjacente ao sistema composicional, e não um simples deslocamento proporcional (Tabela 11).

Tabela 11. Análises de regressão dos balanços iônicos tradicional vs +Cl, +Na, +Al, +ClNa, +ClAl, +NaAl e +ClNaAl

Tradicional vs	Balanço iônico			
	Q4 (População Referência)		Q1-Q3 (População Diagnosticada)	
	Equação	R ²	Equação	R ²
Cl	$y = 1,0449x - 0,3281$	0,940	$y = 1,0704x - 0,3748$	0,964
Na	$y = 0,998x + 0,0074$	1,000	$y = 0,9992x + 0,0043$	1,000
Al	$y = 1,0037x + 0,0078$	0,998	$y = 0,9997x + 0,0167$	0,997
ClNa	$y = 1,0428x - 0,3207$	0,940	$y = 1,0696x - 0,3705$	0,964
ClAl	$y = 1,0485x - 0,3204$	0,938	$y = 1,0701x - 0,3581$	0,957
NaAl	$y = 1,0017x + 0,0152$	0,998	$y = 0,9989x + 0,0211$	0,997
ClNaAl	$y = 1,0465x - 0,3129$	0,939	$y = 1,0693x - 0,3538$	0,957

Em contraste, o sódio exibe efeito mais fraco e sutil sobre o balanço iônico, caracterizado principalmente por pequenos deslocamentos translacionais ($B_0 \neq 0$), sem alterações substantivas na sensibilidade estrutural ($B_1 \approx 1$). Para Q1–Q3, as declividades associadas ao Na diferem estatisticamente da unidade, mas permanecem extremamente próximas da linha de identidade, com coeficientes de determinação muito elevados ($R^2 \approx 1$). Os interceptos, embora estatisticamente distintos de zero, são pequenos em magnitude, indicando efeitos translacionais modestos, sem reancoramento estrutural relevante. O alumínio, por sua vez, não apresenta efeito estrutural detectável: tanto interceptos quanto declividades são estatisticamente compatíveis com $B_0 = 0$ e $B_1 = 1$, confirmando que sua inclusão não modifica a estrutura eletroquímica do balanço iônico na palma de óleo.

Quando o cloro é combinado com outros elementos, seu efeito domina a resposta do sistema. A inclusão conjunta de Cl e Na resulta nos maiores interceptos negativos e em declividades significativamente superior à unidade, refletindo efeitos translacionais aditivos superpostos ao reancoramento estrutural induzido pelo cloro. Em contraste, a inclusão de Cl

com Al gera respostas praticamente idênticas às observadas com Cl isolado, reforçando o caráter estruturalmente passivo do alumínio. O conjunto completo, incorporando Cl, Na e Al, também apresenta interceptos negativos e declividades superiores à unidade, confirmando que o cloro governa a reorganização do balanço iônico, com contribuição secundária do sódio e influência estrutural negligenciável do alumínio.

Para avaliar a dependência dessas relações em relação ao nível de produtividade, a identidade das regressões foi testada por meio de análise de covariância (ANCOVA), comparando a população combinada Q1–Q3 com o quartil de alta produtividade (Q4) (Tabela 12). Para as configurações contendo cloro, não se observa evidência consistente de heterogeneidade de declividades entre os estratos de produtividade, indicando invariância estrutural do processo de reancoramento eletroquímico ao longo do gradiente produtivo. As configurações contendo alumínio também não apresentam diferenças significativas entre estratos, corroborando sua neutralidade estrutural.

Tabela 12. Teste de Identidade entre equações de balanço iônico das populações Q1-Q3 vs Q4

Tradicional vs	ΔB_0 (intercepto)	ΔB_1 (declividade)	Teste conjunto	Interpretação
Cl	ns	ns	ns	Invariância estrutural
Na	ns (marg.)	ns (marg.)	ns	Invariância estrutural
Al	ns	ns	ns	Invariância estrutural
Cl + Na	ns	ns	ns	Invariância estrutural
Cl + Al	ns	ns	ns	Invariância estrutural
Na + Al	ns	ns	ns	Invariância estrutural
Cl + Na + Al	ns	ns	ns	Invariância estrutural

Em contraste, o sódio apresenta diferenças estatisticamente significativas entre Q1–Q3 e Q4 tanto nos interceptos quanto nas declividades, bem como no teste conjunto da ANCOVA. Embora a magnitude dessas diferenças seja pequena e as declividades permaneçam próximas da unidade em ambos os estratos, esse resultado indica que os efeitos translacionais associados

ao sódio são fracamente modulados pelo nível de produtividade. Ainda assim, os valores elevados de R^2 observados em ambos os estratos confirmam a preservação da proporcionalidade e a ausência de reestruturação relevante do sistema de balanço iônico (Tabela 11).

Esses resultados demonstram que a expansão do espaço composicional induz um reancoramento eletroquímico sistemático do sistema nutricional, dominado pelo cloro. O sódio exerce influência secundária e dependente do contexto, detectável estatisticamente, porém limitada em magnitude, enquanto o alumínio permanece estruturalmente passivo. Os padrões multivariados examinados na seção 5.5 representam a expressão estatística desse mesmo processo de reancoramento eletroquímico no espaço dos índices CND.

4.5 Relações multivariadas da composição nutricional foliar após a inclusão de Cl, Na e Al

Visando examinar como o reancoramento eletroquímico identificado pela análise de balanço iônico se expressa na estrutura multivariada dos índices CND, foi aplicada análise de componentes principais (PCA) às configurações composicionais que incorporam Cl, Na e Al.

A PCA indicou que os três primeiros componentes principais apresentaram autovalores superiores a 1 e explicaram conjuntamente 63,07% da variância total dos índices CND (Tabela 13). O primeiro componente principal (CP1) apresentou autovalor de 3,476, explicando 31,58% da variância total, enquanto o segundo (CP2) e o terceiro (CP3) exibiram autovalores de 1,849 e 1,617, explicando 16,80% e 14,69% da variância, respectivamente.

Tabela 13. Coeficientes de carga ("loadings") das variáveis nos CP do modelo multivariado.

Loadings dos nutrientes nos três primeiros PCs			
Varável Multinutriente	PC1	PC2	PC3
VN	0,7532	0,3535	0,0394
VP	0,9117	-0,0407	0,0292
VK	0,7364	0,4338	-0,0331
VCa	0,2275	-0,7343	0,3039
VMg	0,2759	-0,2325	-0,6231
VS	0,8241	-0,3019	0,1818
VB	0,5910	-0,1224	0,3993
VCu	0,4941	-0,4637	-0,3586
VFe	-5,59x10 ⁻³	-0,2026	0,2937
VMn	-0,3412	-0,7438	0,0814
VZn	0,1286	-0,1618	-0,8482
Autovalor	3,476	1,849	1,617
Variância explicada (%)	31,58	16,80	14,69
Variância acumulada (%)	31,58	48,38	63,07

A estrutura dos componentes principais mostrou-se coerente com a hierarquia funcional inferida a partir da análise de balanço iônico. O Cl esteve associado ao eixo dominante de reorganização multinutriente, enquanto o Na contribuiu principalmente para contrastes secundários, e o Al exerceu efeitos comparativamente mais fracos e difusos sobre a estrutura multivariada.

O CP1 foi caracterizado por cargas positivas elevadas associadas a P, S, N, K e B, representando um gradiente geral de reorganização multinutriente. O CP2 apresentou cargas negativas dominantes associadas a Ca e Mn, enquanto o CP3 foi definido principalmente por contribuições negativas de Zn e Mg, evidenciando contrastes específicos entre grupos de nutrientes com funções fisiológicas distintas (Tabela 13).

Modelos lineares mistos ajustados aos escores de CP1, CP2 e CP3 revelaram efeitos altamente significativos ($p < 0,001$) de Cl, Na e Al, bem como de todas as interações de segunda ordem e da interação tripla. O efeito aleatório de talhão apresentou variância significativamente diferente de zero em todos os modelos, confirmando a relevância da variabilidade entre talhões na organização multinutriente.

Para o CP1, a inclusão isolada de Cl promoveu aumento consistente na magnitude do desequilíbrio multinutriente, refletindo seu papel estrutural dominante. A inclusão isolada de Na ou de Al apresentou efeitos mais moderados, enquanto a inclusão conjunta de Na e Al na ausência de Cl produziu o maior deslocamento médio dos escores dos componentes, indicando reorganização intensa do espaço nutricional. Padrões análogos foram observados para CP2 e CP3, demonstrando que Cl, Na e Al afetam não apenas a magnitude dos índices CND, mas também a hierarquia relativa entre grupos específicos de nutrientes.

Esses resultados indicam que a expansão do espaço composicional, ao modificar o balanço eletroquímico do sistema nutricional, promove uma reorganização multivariada consistente e interpretável dos índices CND. Essa reorganização fornece o contexto estatístico necessário para examinar, na seção seguinte, o alinhamento funcional entre a diagnose multinutriente e a produtividade relativa.

4.6 Alinhamento funcional entre desequilíbrio multinutriente e produtividade relativa

A magnitude do desequilíbrio multinutriente (||I|), calculada a partir dos índices CND dos 11 nutrientes tradicionalmente considerados, discriminou os talhões de alta produtividade relativa (Q4) daqueles pertencentes aos quartis inferiores (Q1–Q3) em todas as configurações composicionais avaliadas ($p < 0,01$) (Tabela 14). Entretanto, a intensidade dessa discriminação mostrou-se fortemente dependente da configuração do espaço composicional adotada.

As configurações que incluíram cloro de forma isolada (Cl) e aquelas que incorporaram conjuntamente sódio e alumínio (NaAl) apresentaram desempenho discriminatório excelente, com valores de AUC próximos de 0,95, além de associações monotônicas mais fortes entre a produtividade relativa ajustada à idade e a magnitude do desequilíbrio multinutriente ($\rho = -0,44$ e $\rho = -0,59$, respectivamente).

Tabela 14. Relacionamento entre o desequilíbrio multinutriente e a produtividade relativa ajustada à idade da palma de óleo sob diferentes configurações composicionais do método da Diagnose Nutricional Composicional

Configuração	¹ Desequilíbrio médio (Q4)	Desequilíbrio médio (Q1–Q3)	$\Delta(Q4-Q1-Q3)$	² p (MW)	AUC	Spearman (CFFrel vs Desequilíbrio)	p (Spearman)
Tradicional	3,164	3,608	-0,444	$7,68 \times 10^{-4}$	0,629	-0,221	$1,02 \times 10^{-4}$
+Cl	3,165	5,500	-2,335	$2,69 \times 10^{-31}$	0,946	-0,443	$4,47 \times 10^{-16}$
+Na	3,168	3,636	-0,468	$5,01 \times 10^{-4}$	0,633	-0,235	$3,39 \times 10^{-5}$
+Al	3,158	3,572	-0,414	$2,64 \times 10^{-3}$	0,615	-0,204	$3,51 \times 10^{-4}$
+Cl+Na	3,165	3,847	-0,681	$5,29 \times 10^{-7}$	0,692	-0,358	$1,20 \times 10^{-10}$
+Cl+Al	3,155	3,593	-0,438	$1,19 \times 10^{-3}$	0,624	-0,225	$7,65 \times 10^{-5}$
+Na+Al	3,163	5,584	-2,421	$1,92 \times 10^{-31}$	0,947	-0,588	$1,30 \times 10^{-29}$
+Cl+Na+Al	3,158	3,612	-0,454	$8,43 \times 10^{-4}$	0,628	-0,236	$3,12 \times 10^{-5}$

¹ Desequilíbrio = $\sqrt{\Sigma(ICND^2)}$ calculado somente com os 11 nutrientes clássicos em cada configuração.

² O teste de Mann–Whitney (MW) testa diferenças na distribuição de uma variável contínua entre dois grupos independentes, sem assumir normalidade.

Em contraste, tanto o conjunto tradicional de 11 nutrientes quanto a expansão completa do espaço composicional (+Cl+Na+Al) exibiram discriminação fraca a moderada ($AUC \approx 0,63$), com associações mais limitadas entre desequilíbrio multinutriente e produtividade relativa. Esse comportamento evidencia que o alinhamento funcional entre diagnose multinutriente e desempenho produtivo não aumenta de forma monotônica com a dimensionalidade do conjunto de nutrientes.

A decomposição dos efeitos das expansões revelou ainda que a inclusão isolada de Na ou de Al produziu respostas funcionais modestas, próximas àquelas observadas na configuração tradicional. Em contraste, a inclusão conjunta de Na e Al resultou em resposta não aditiva, sugerindo a ocorrência de interação composicional capaz de induzir reorganização estrutural relevante do espaço diagnóstico.

Esses resultados indicam que a coerência funcional entre a diagnose multinutriente e a produtividade relativa emerge de interações específicas entre componentes composicional, particularmente daquelas que promovem reancoramento estrutural do sistema nutricional. Esse padrão é consistente com os mecanismos eletroquímicos e multivariados discutidos nas seções anteriores, reforçando que a capacidade preditiva do desequilíbrio multinutriente depende menos do número de componentes incluídos e mais da natureza das interações estruturais que esses componentes induzem.

4.7 Deslocamentos nos teores ótimos composicionais de nutrientes

Os teores ótimos composicionais de nutrientes, estimados a partir das funções de calibração entre os ICND e as concentrações foliares, apresentaram deslocamentos sistemáticos entre as diferentes configurações composicionais para todos os 11 nutrientes tradicionalmente avaliados. Em todas as situações avaliadas, a expansão dos conjuntos de nutrientes modificou tanto as concentrações estimadas associadas às classes diagnósticas quanto a largura de seus intervalos de confiança, reforçando que o ótimo composicional constitui uma propriedade multinutriente do sistema, e não um atributo isolado de um único nutriente.

Para todos os nutrientes, as relações entre os índices CND e as concentrações foliares foram descritas por modelos logarítmicos, indicando uma escala não linear entre o estado composicional relativo e o conteúdo relativo de nutrientes (Tabela 15).

O potássio foi selecionado como estudo de caso devido à sua elevada exportação relativa pelos cachos de frutos frescos e ao seu papel central na nutrição da palma de óleo, permitindo ilustrar de forma mais explícita como a expansão composicional afeta simultaneamente os teores ótimos estimados e a precisão diagnóstica. Para esse nutriente, as relações ICND_K-K são apresentadas graficamente para o conjunto tradicional e para as estruturas correspondentes às inclusões de Cl, de Na + Al e de Cl, Na e Al (Figura 2).

Para o potássio, a relação entre o índice de diagnose nutricional composicional (ICND_K) e a concentração foliar de K foi descrita por um modelo logarítmico da forma $ICND_K = b_0 + b_1 \ln(K)$ em todas os conjuntos de nutrientes avaliadas. Todos os modelos ajustados foram altamente significativos ($p < 0,001$), com coeficientes de determinação (R^2) variando de 0,711 a 0,784, dependendo dos elementos incluídos no conjunto. O maior valor de R^2 foi obtido para o conjunto de nutrientes que inclui simultaneamente Cl e Na, enquanto o menor ocorreu quando apenas Al foi adicionado ao conjunto tradicional, com desempenhos intermediários observados para as demais configurações. Apesar dessas diferenças, todos os modelos forneceram descrição robusta da relação ICND_K–K (Figura 2).

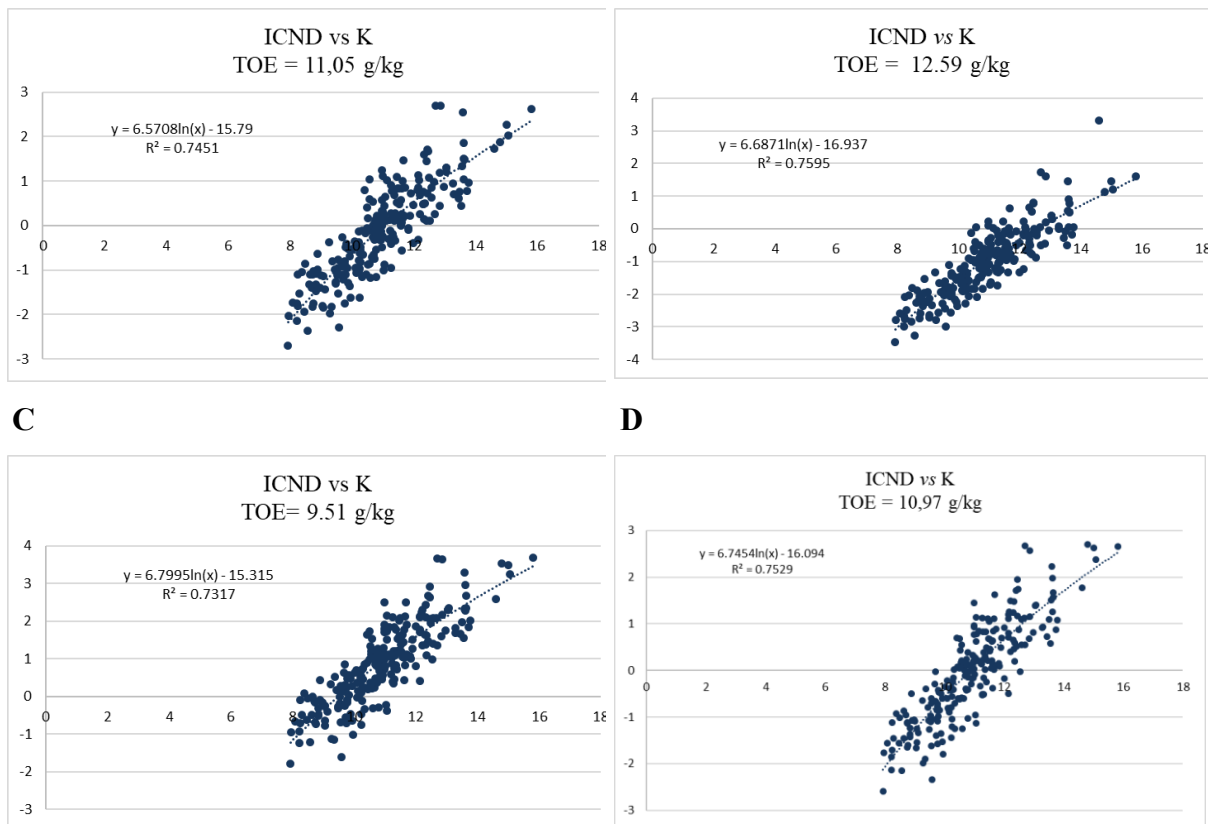
Tabela 15. Equações de regressão para o teor ótimo de nutrientes (g/kg) em plantios de Palma-de-óleo, calculada pela relação entre os teores foliares e os índices CND

Equações									
	Tradicional	R ²	Cl	R ²	Na	R ²	Al	R ²	
N	$y = 7.547\ln(x) - 24.605$	0,378	$y = 8.4804\ln(x) - 27.547$	0,450	$y = 8.2632\ln(x) - 26.829$	0,450	$y = 7.2466\ln(x) - 23.557$	0,344	
P	$y = 6.157\ln(x) - 3.297$	0,336	$y = 6.9843\ln(x) - 5.5412$	0,404	$y = 7.1089\ln(x) - 3.6633$	0,422	$y = 5.2716\ln(x) - 2.7598$	0,262	
K	$y = 6.5708\ln(x) - 15.79$	0,745	$y = 6.6871\ln(x) - 16.937$	0,760	$y = 6.7697\ln(x) - 16.216$	0,767	$y = 6.4111\ln(x) - 15.371$	0,711	
Ca	$y = 5.386\ln(x) - 10.64$	0,742	$y = 5.5876\ln(x) - 12.252$	0,773	$y = 5.7128\ln(x) - 11.203$	0,791	$y = 4.8714\ln(x) - 9.5906$	0,644	
Mg	$y = 3.6668\ln(x) - 3.0528$	0,826	$y = 3.7244\ln(x) - 3.8327$	0,848	$y = 3.6888\ln(x) - 3.0444$	0,857	$y = 3.6151\ln(x) - 2.9824$	0,761	
S	$y = 6.1823\ln(x) - 3.9203$	0,423	$y = 7.0823\ln(x) - 6.5054$	0,487	$y = 7.3836\ln(x) - 4.5435$	0,521	$y = 5.0812\ln(x) - 3.1616$	0,301	
B	$y = 5.9969\ln(x) + 26.196$	0,718	$y = 6.2143\ln(x) + 25.913$	0,749	$y = 5.9521\ln(x) + 26.078$	0,768	$y = 5.6555\ln(x) + 24.748$	0,636	
Cu	$y = 4.9901\ln(x) + 25.012$	0,627	$y = 5.2049\ln(x) + 24.78$	0,665	$y = 5.5517\ln(x) + 27.889$	0,698	$y = 4.4691\ln(x) + 22.448$	0,504	
Fe	$y = 3.9561\ln(x) + 7.5176$	0,878	$y = 4.0665\ln(x) + 6.9953$	0,889	$y = 3.9793\ln(x) + 7.6122$	0,900	$y = 3.9433\ln(x) + 7.4888$	0,855	
Mn	$y = 2.5028\ln(x) + 3.5942$	0,969	$y = 2.59\ln(x) + 3.2385$	0,921	$y = 2.4848\ln(x) + 3.5915$	0,975	$y = 2.4651\ln(x) + 3.5607$	0,952	
Zn	$y = 5.1047\ln(x) + 20.777$	0,812	$y = 7.5046\ln(x) + 30.621$	0,840	$y = 4.9792\ln(x) + 20.32$	0,843	$y = 4.9303\ln(x) + 20.104$	0,734	
	ClNa	R ²	ClAl	R ²	NaAl	R ²	ClNaAl	R ²	
N	$y = 8.9478\ln(x) - 28.973$	0,510	$y = 8.0452\ln(x) - 26.08$	0,410	$y = 8.0301\ln(x) - 24.532$	0,405	$y = 8.5487\ln(x) - 27.642$	0,465	
P	$y = 7.4271\ln(x) - 3.2247$	0,481	$y = 6.0124\ln(x) - 3.0633$	0,329	$y = 6.0989\ln(x) - 1.3906$	0,332	$y = 6.6491\ln(x) - 3.3053$	0,393	
K	$y = 6.3259\ln(x) - 14.87$	0,784	$y = 6.5996\ln(x) - 15.786$	0,736	$y = 6.7995\ln(x) - 15.315$	0,732	$y = 6.7454\ln(x) - 16.094$	0,753	
Ca	$y = 5.8478\ln(x) - 11.075$	0,813	$y = 5.1878\ln(x) - 10.155$	0,695	$y = 5.2668\ln(x) - 8.9921$	0,707	$y = 5.4767\ln(x) - 10.66$	0,743	
Mg	$y = 3.9107\ln(x) - 2.9984$	0,872	$y = 3.5731\ln(x) - 2.9225$	0,794	$y = 3.5615\ln(x) - 2.2024$	0,801	$y = 3.6038\ln(x) - 2.9307$	0,825	
S	$y = 7.492\ln(x) - 3.9724$	0,570	$y = 5.9406\ln(x) - 3.6256$	0,378	$y = 6.0712\ln(x) - 1.7271$	0,383	$y = 6.7276\ln(x) - 4.0253$	0,449	
B	$y = 6.2493\ln(x) + 27.784$	0,792	$y = 5.8153\ln(x) + 25.504$	0,681	$y = 5.6135\ln(x) + 25.848$	0,687	$y = 5.7898\ln(x) + 25.448$	0,723	
Cu	$y = 5.4419\ln(x) + 27.747$	0,735	$y = 4.6832\ln(x) + 23.566$	0,564	$y = 5.0015\ln(x) + 26.484$	0,580	$y = 5.1209\ln(x) + 25.806$	0,627	
Fe	$y = 4.1583\ln(x) + 8.1966$	0,910	$y = 4.0238\ln(x) + 7.6876$	0,874	$y = 3.8934\ln(x) + 8.3039$	0,882	$y = 4.0259\ln(x) + 7.7368$	0,894	
Mn	$y = 2.561\ln(x) + 3.8464$	0,978	$y = 2.4673\ln(x) + 3.5819$	0,962	$y = 2.4409\ln(x) + 4.0139$	0,961	$y = 2.4544\ln(x) + 3.5802$	0,968	
Zn	$y = 4.8137\ln(x) + 19.682$	0,861	$y = 4.8039\ln(x) + 19.63$	0,771	$y = 4.7146\ln(x) + 20.246$	0,779	$y = 4.7588\ln(x) + 19.48$	0,805	

Com base nas equações ajustadas, foram estimadas as concentrações foliares de K correspondentes às classes diagnósticas análogas às faixas clássicas de Beaufils (ICND_K = -1,33; -0,67; 0,00; +0,67; +1,33) para cada configuração composicional. Essas estimativas evidenciaram deslocamentos das concentrações foliares associadas a uma mesma classe diagnóstica em função do conjunto de nutrientes adotado, indicando que, para um mesmo valor de ICND, a concentração estimada de K varia conforme a inclusão de Cl, Na e/ou Al no espaço composicional (Tabela 16).

Além dos deslocamentos nas concentrações estimadas, observaram-se diferenças substanciais na largura dos intervalos de confiança (IC 95%) associados. A configuração tradicional apresentou, intervalos mais amplos em todas as classes diagnósticas, enquanto as estruturas expandidas resultaram em intervalos significativamente mais estreitos. Essa redução da incerteza foi observada não apenas para o potássio, mas de forma sistemática entre os nutrientes, refletindo a diminuição da variabilidade residual quando o estado nutricional é avaliado em um espaço composicional mais completo.

Figura 2. Teores ótimo estimado para o Potássio pelos métodos (A)Tradicional, (B) +Cl, (C) +NaAl e (D) +ClNaAl



Entre as configurações expandidas, a inclusão conjunta de Cl e Na produziu os intervalos de confiança mais estreitos para a maioria das classes diagnósticas, seguida pelas configurações incluindo Na isoladamente ou Na combinado com Al. A inclusão isolada de Al resultou em redução mais moderada da incerteza em relação à configuração tradicional, enquanto o conjunto completo contendo Cl, Na e Al apresentou larguras intermediárias de intervalos de confiança, indicando efeitos composicionais combinados, porém não estritamente aditivos.

Tabela 16. Teores ótimos para todas as combinações correspondentes às faixas análogas as de Beaufils.

Teor Ótimo Estimado (TOE) "Beaufils"												
Índice CND	Classe Diagnóstica	N (g/kg)	P (g/kg)	K (g/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	S (g/kg)	B (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)
-1,33	Deficiente Tendência a	21,84	1,38	9,03	5,63	1,60	1,52	10,16	5,10	106,86	139,85	13,16
-0,66	Suficiente	23,87	1,53	10,00	6,38	1,92	1,69	11,36	5,83	126,58	182,77	15,01
0,00	Suficiente Tendência a	26,05	1,71	11,05	7,21	2,30	1,89	12,68	6,66	149,56	237,91	17,08
0,66	excessivo	28,43	1,90	12,22	8,15	2,75	2,10	14,15	7,60	176,71	309,69	19,44
1,33	Excessivo	31,07	2,12	13,53	9,23	3,30	2,34	15,83	8,69	209,32	404,73	22,17
ComCl												
-1,33	Deficiente Tendência a	22,00	1,83	10,32	7,06	1,96	2,08	12,48	6,63	129,11	171,41	14,16
-0,66	Suficiente	23,81	2,01	11,40	7,96	2,34	2,28	13,90	7,54	152,23	222,00	15,49
0,00	Suficiente Tendência a	25,74	2,21	12,59	8,96	2,80	2,51	15,46	8,56	179,06	286,43	16,91
0,66	excessivo	27,82	2,43	13,89	10,08	3,34	2,75	17,19	9,72	210,61	369,55	18,46
1,33	Excessivo	30,11	2,67	15,35	11,36	4,00	3,02	19,15	11,05	248,32	478,64	20,19
ComNa												
-1,33	Deficiente Tendência a	21,88	1,39	9,01	5,63	1,59	1,55	10,01	5,18	105,72	138,01	12,94
-0,66	Suficiente	23,73	1,53	9,95	6,33	1,91	1,69	11,20	5,85	125,11	180,72	14,80
0,00	Suficiente Tendência a	25,70	1,67	10,97	7,11	2,28	1,85	12,51	6,58	147,67	235,69	16,90
0,66	excessivo	27,84	1,84	12,09	7,98	2,73	2,02	13,98	7,42	174,31	307,39	19,29
1,33	Excessivo	30,19	2,02	13,35	8,97	3,27	2,22	15,65	8,37	206,27	402,51	22,07

ComAI												
-1,33	Deficiente	21,48	1,31	8,93	5,45	1,58	1,43	9,95	4,89	106,87	137,55	12,95
-0,66	Tendência a											
	Suficiente	23,56	1,49	9,92	6,25	1,90	1,64	11,20	5,68	126,66	180,50	14,83
0,00	Suficiente	25,80	1,69	10,99	7,16	2,28	1,86	12,58	6,59	149,73	235,91	16,95
	Tendência a											
0,66	excessivo	28,26	1,91	12,19	8,20	2,74	2,12	14,14	7,64	177,01	308,33	19,38
1,33	Excessivo	31,00	2,17	13,53	9,41	3,30	2,42	15,92	8,87	209,78	404,62	22,20
ComCIa												
-1,33	Deficiente	21,96	1,29	8,50	5,29	1,53	1,42	9,48	4,78	101,19	132,52	12,72
-0,66	Tendência a											
	Suficiente	23,66	1,41	9,45	5,93	1,82	1,56	10,56	5,41	118,88	172,14	14,62
0,00	Suficiente	25,47	1,54	10,49	6,64	2,15	1,70	11,73	6,11	139,33	222,74	16,77
	Tendência a											
0,66	excessivo	27,42	1,69	11,64	7,44	2,55	1,86	13,04	6,89	163,29	288,21	19,23
1,33	Excessivo	29,56	1,85	12,94	8,34	3,02	2,03	14,51	7,80	191,83	374,38	22,10
ComCIAI												
-1,33	Deficiente	21,67	1,33	8,94	5,48	1,56	1,47	9,91	4,91	106,37	136,61	12,74
-0,66	Tendência a											
	Suficiente	23,55	1,49	9,89	6,23	1,88	1,65	11,12	5,67	125,64	179,23	14,65
0,00	Suficiente	25,57	1,66	10,93	7,08	2,27	1,84	12,46	6,53	148,03	234,20	16,81
	Tendência a											
0,66	excessivo	27,75	1,86	12,08	8,04	2,73	2,06	13,96	7,52	174,41	306,01	19,28
1,33	Excessivo	30,16	2,08	13,37	9,15	3,29	2,30	15,66	8,67	206,01	401,48	22,17
ComNaAI												
-1,33	Deficiente	17,98	1,01	7,82	4,28	1,69	1,07	7,90	3,85	84,23	112,02	10,30
-0,66	Tendência a											
	Suficiente	19,54	1,13	8,63	4,86	2,04	1,19	8,90	4,40	100,05	147,40	11,87
0,00	Suficiente	21,21	1,26	9,51	5,51	2,46	1,33	10,01	5,02	118,53	193,15	13,65
	Tendência a											
0,66	excessivo	23,03	1,40	10,48	6,25	2,96	1,48	11,26	5,73	140,42	253,12	15,70

Continua...106

1,33	Excessivo	25,04	1,56	11,56	7,10	3,57	1,65	12,69	6,55	166,79	333,06	18,10
ComClNaAl												
-1,33	Deficiente Tendência a	21,71	1,35	8,92	5,49	1,56	1,49	9,81	5,00	105,20	135,29	12,62
-0,66	Suficiente	23,48	1,49	9,85	6,21	1,88	1,65	11,01	5,70	124,25	177,74	14,53
0,00	Suficiente Tendência a	25,36	1,64	10,87	7,00	2,25	1,82	12,34	6,48	146,38	232,58	16,69
0,66	excessivo	27,39	1,82	11,98	7,90	2,71	2,01	13,83	7,37	172,45	304,33	19,17
1,33	Excessivo	29,63	2,01	13,23	8,93	3,26	2,22	15,53	8,40	203,67	399,83	22,07

5. DISCUSSÃO

Este estudo demonstra que restringir a diagnose nutricional da palma de óleo a rígidos conjuntos de nutrientes introduz viés estrutural na avaliação do equilíbrio multinutriente. Tal viés manifesta-se na reorganização das normas do CND, na concordância diagnóstica, nas relações de balanço iônico e no alinhamento funcional com a produtividade relativa após a expansão do espaço composicional. De acordo com a teoria de dados composicionais, a omissão de componentes em um conjunto fechado força uma redistribuição artificial das partes remanescentes, deslocando o centro composicional mesmo quando o verdadeiro balanço iônico da planta permanece inalterado (Aitchison, 1986; Parent & Dafir, 1992; Parent et al., 2013).

5.1 Cloro como agente dominante do reancoramento eletroquímico

Entre os elementos avaliados, o cloro emergiu como o principal determinante da reorganização composicional. A análise de balanço iônico demonstrou que a inclusão de Cl induz simultaneamente um deslocamento do estado eletroquímico de referência e uma alteração na sensibilidade estrutural das relações de balanço iônico, caracterizando um reancoramento eletroquímico, e não um simples deslocamento proporcional. Esse comportamento foi evidenciado por interceptos significativamente negativos combinados a declividades significativamente superior à unidade, indicando modificação tanto do nível de referência quanto da resposta estrutural do sistema.

Esse padrão é coerente com a elevada acumulação de Cl nos tecidos da palma de óleo e com seus papéis fisiológicos bem estabelecidos na osmorregulação, no controle estomático e na homeostase iônica (Broyer et al., 1954; Geilfus, 2018; Colmenero-Flores et al., 2019). Conseqüentemente, a exclusão do cloro de configurações diagnósticas composicionais distorce o equilíbrio multinutriente e propaga viés sistemático para os índices diagnósticos dos nutrientes tradicionalmente considerados.

5.2 Contrastes estruturais: sódio e alumínio como efeitos translacionais

Em contraste com o cloro, o sódio e o alumínio não induziram reestruturação relevante do sistema de balanço iônico. O sódio apresentou efeitos translacionais fracos, porém estatisticamente detectáveis, com declividades permanecendo muito próximas da linha de

identidade, indicando preservação da proporcionalidade e ausência de reancoramento estrutural substantivo. O alumínio, por sua vez, manteve-se estruturalmente neutro, com interceptos e declividades estatisticamente compatíveis com identidade eletroquímica ao longo dos estratos de produtividade.

Neste contexto, o termo *translação* refere-se a um deslocamento global do espaço composicional induzido pela inclusão de novos componentes, no qual a geometria interna das relações multinutrientes permanece essencialmente preservada. Em contraste, *reancoramento* refere-se à redefinição do estado eletroquímico de referência do sistema, na qual a inclusão de um novo componente altera a sensibilidade estrutural das relações multinutrientes e modifica a geometria interna do espaço composicional, indo além de um simples deslocamento proporcional.

Os comportamentos associados ao Na e ao Al são apresentados aqui como contrastes conceituais que permitem delimitar efeitos de translação daqueles de reancoramento estrutural, sem deslocar o foco central do papel do cloro no sistema. Do ponto de vista fisiológico e edáfico, esses resultados são coerentes com o reconhecimento crescente do Na como elemento funcional em espécies não halófitas e com a elevada frequência de Al em solos tropicais ácidos, nos quais pode ser compartimentalizado nos tecidos vegetais (Maathuis, 2014; Bojórquez-Quintal et al., 2017).

5.3 Estabilidade estrutural ao longo do gradiente de produtividade

A invariância estrutural das relações de balanço iônico ao longo dos estratos de produtividade indica que os efeitos observados refletem propriedades intrínsecas da expansão composicional, e não respostas específicas ao nível produtivo. Para as configurações contendo cloro, não foi detectada heterogeneidade sistemática de declividades entre talhões de alta e baixa produtividade, evidenciando que o reancoramento eletroquímico induzido pelo Cl é estruturalmente estável ao longo do gradiente produtivo.

Essa estabilidade reforça que a reorganização observada não é contingente à produtividade, mas emerge da coerência entre a composição mineral efetivamente expressa na folha e o espaço composicional utilizado na diagnose.

5.4 Multivariada do equilíbrio nutricional

Os padrões multivariados revelados por PCA e MANOVA representam a projeção estatística do reancoramento eletroquímico identificado pela análise de balanço iônico. O primeiro componente principal corresponde a um eixo geral de reorganização multinutriente, integrando deslocamentos coordenados entre macro e micronutrientes, e expressa o efeito multivariado dominante da inclusão do cloro.

Os componentes principais secundários refletem contrastes mais finos dentro do espaço composicional reorganizado, coerentes com os efeitos mais fracos e mais dependentes do contexto associados ao sódio e ao alumínio. A significância dos efeitos principais e das interações envolvendo Cl, Na e Al nos modelos mistos confirma que a expansão composicional altera não apenas a magnitude do desequilíbrio multinutriente, mas também a geometria interna das relações entre nutrientes, reforçando que o status nutricional emerge de interações multivariadas e não de efeitos independentes dos elementos.

5.5 Alinhamento funcional com a produtividade relativa

Além das evidências estruturais e multivariadas, a expansão do espaço composicional refletiu-se em alterações sistemáticas no alinhamento funcional entre a magnitude do desequilíbrio multinutriente e a produtividade relativa ajustada à idade. Importa destacar que, em cada configuração composicional, a população de referência de alta produtividade (Q4) foi mantida fixa, de modo que as diferenças observadas não decorrem da definição da referência, mas emergem exclusivamente da reorganização geométrica do espaço composicional, que altera a média geométrica, as variáveis multinutrientes e sua estrutura de covariância.

O contraste sistemático entre as diferentes expansões confirma que os efeitos detectados refletem propriedades estruturais do arcabouço composicional, e não artefatos de normalização. Configurações que induziram reorganização estrutural relevante particularmente aquelas envolvendo Cl e a combinação Na + Al apresentaram melhor alinhamento funcional entre diagnose multinutriente e produtividade relativa.

5.6 Robustez diagnóstica: faixas fixas *versus* PRA

O comportamento contrastante entre faixas fixas análogas às de Beaufile e referências internas específicas por talhão (PRA) reforça que a robustez diagnóstica não é uma propriedade

intrínseca do conjunto de nutrientes, mas uma função da estrutura de referência adotada. Limiarizações fixas mostraram-se altamente sensíveis a translações do espaço composicional, colapsando sob deslocamentos gerais e resultando em reclassificações funcionais extensas. Em contraste, o PRA absorve esses deslocamentos por construção, preservando maior coerência diagnóstica relativa.

Esse contraste pode ser explicado mecanisticamente pelas diferenças estruturais entre DRIS e CND. Enquanto no DRIS a soma dos índices é algebricamente constrangida a zero, no CND os índices decorrem de transformações log-razão em relação à média geométrica da composição completa, sendo fechados em sentido geométrico, e não algébrico. A elevada robustez observada para referências internas corrobora a base conceitual originalmente proposta por Wadt (1996) e demonstra sua generalização bem-sucedida para índices CND.

5.7 Implicações quantitativas: teores ótimos como propriedades emergentes

Além da classificação diagnóstica, a expansão composicional afetou a interpretação quantitativa do status nutricional. A abordagem composicional adotada vincula as concentrações foliares à sua posição relativa no sistema multinutriente, expressando os teores ótimos como propriedades emergentes do equilíbrio do sistema, e não como limiares univariados fixos.

A inclusão de Cl, Na e Al reduziu a incerteza associada aos teores estimados correspondentes às classes diagnósticas, refletindo a diminuição da variabilidade residual quando o estado nutricional é avaliado em um espaço composicional mais completo. Ao mesmo tempo, os deslocamentos sistemáticos dos teores ótimos estimados confirmam que referências diagnósticas dependem da estrutura composicional adotada.

5.8 Síntese interpretativa

Em conjunto, os resultados sustentam que a expansão do arcabouço composicional do CND induz uma reorganização coerente, sistêmica e mecanisticamente interpretável da diagnose nutricional na palma de óleo. O cloro atua como elemento estruturalmente dominante, promovendo reancoramento eletroquímico do sistema; o sódio exerce influência secundária e dependente do contexto; e o alumínio permanece estruturalmente passivo. Esses achados reforçam que a robustez agrônômica da diagnose nutricional depende menos do número

absoluto de nutrientes considerados e mais da coerência entre o espaço composicional adotado, a fisiologia da cultura e o critério diagnóstico empregado. A adoção de configurações composicionais expandidos, combinados a estratégias diagnósticas relativas, maximiza a extração de informação agronômica do sistema CND, reduzindo o risco de decisões baseadas em interpretações univariadas ou estruturalmente inconsistentes.

6. CONCLUSÕES

A expansão do conjunto composicional da diagnose nutricional reorganiza de forma sistemática as normas multinutrientes e a estrutura multivariada do equilíbrio nutricional da palma de óleo, demonstrando que o sistema de referência diagnóstica é intrinsecamente dependente da dimensionalidade do espaço composicional adotado.

O cloro emerge como o principal contribuinte para a redefinição estrutural do sistema diagnóstico composicional, exercendo influência dominante sobre as relações de balanço iônico, os índices diagnósticos e os teores ótimos nutricionais estimados no contexto composicional.

O sódio e o alumínio não alteram substancialmente a estrutura primária do balanço iônico, porém induzem marcada instabilidade em diagnoses baseadas em limiares univariados fixos, independentemente de a reorganização composicional ser avaliada por inclusão ou por exclusão de componentes, evidenciando as limitações intrínsecas de esquemas de classificação absoluta sob restrições composicionais.

A classificação baseada em referências internas específicas por talhão (PRA) mantém elevada concordância diagnóstica tanto sob esquemas de inclusão (conjunto tradicional 11 como referência) quanto de exclusão (conjunto completo 14 como referência), confirmando sua robustez frente a translações do espaço composicional e sua consistência conceitual com estruturas de dados fechados e relativos.

Os teores ótimos nutricionais composicionais constituem atributos emergentes do conjunto composicional adotado; portanto, sua interpretação quantitativa é condicionada pela estrutura do espaço composicional empregado, com implicações diretas para a assertividade da diagnose e da tomada de decisão agronômica.

Em conjunto, estes resultados sustentam a adoção de conjuntos composicionais expandidos para a diagnose nutricional da palma de óleo, destacando a inclusão do cloro como requisito estrutural para uma inferência diagnóstica robusta, mecanisticamente consistente e funcionalmente alinhada à produtividade relativa dos plantios, com a consideração contextual de sódio e alumínio como elementos moduladores secundários do espaço composicional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação abordou aspectos centrais do crescimento, da produção de biomassa e da nutrição mineral em palmeiras, explorando diferentes contextos produtivos por meio de abordagens quantitativas. Ao longo dos capítulos, a planta foi analisada como um sistema no qual a assimilação de carbono, a aquisição de nutrientes minerais, a alocação interna de recursos e a composição nutricional dos tecidos se articulam para determinar o desempenho funcional.

O estudo conduzido com mudas de macaúba evidenciou que, na fase inicial de desenvolvimento, o crescimento está fortemente associado à expansão estrutural da planta, em particular à construção da superfície foliar, que atua como elemento integrador entre biomassa, nutrição e funcionamento fisiológico. A participação expressiva do caule saxofone como compartimento de reserva acrescenta um elemento relevante à compreensão das estratégias iniciais de crescimento em palmeiras.

No capítulo dedicado à palma de óleo, a aplicação da Diagnose Nutricional Composicional mostrou que a interpretação do estado nutricional depende do conjunto de nutrientes adotado. A inclusão do cloro, promoveu reorganizações das normas multinutrientes e das inferências diagnósticas, evidenciando que referências nutricionais e diagnósticos são condicionados pelo conjunto analítico empregado.

Considerados em conjunto, os capítulos indicam que o crescimento e a nutrição em palmeiras não podem ser adequadamente compreendidos por meio da análise isolada de variáveis individuais. Tanto a eficiência de uso de recursos quanto o estado nutricional manifestam-se como propriedades sistêmicas, dependentes de relações quantitativas entre atributos estruturais, fisiológicos e nutricionais.

Do ponto de vista metodológico e aplicado, este trabalho fornece subsídios para o manejo de mudas de macaúba, ao evidenciar a centralidade da expansão estrutural no

crescimento inicial, e para a diagnose nutricional de plantios adultos de palma de óleo, ao destacar a necessidade de abordagens multinutrientes consistentes.

7. REFERÊNCIAS

AITCHISON, J. (1986). **The Statistical Analysis of Compositional Data**. London: Chapman & Hall. doi: 10.1007/978-94-009-4109-0

BOJÓRQUEZ-QUINTAL, E., ESCALANTE-MAGAÑA, C., ECHEVARRÍA-MACHADO, I., and MARTÍNEZ-ESTÉVEZ, M. (2017). **Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils**. *Front. Plant Sci.* 8:1767. doi: 10.3389/fpls.2017.01767

BROYER, T. C., CARLTON, A. B., JOHNSON, C. M., and Stout, P. R. (1954). **Chlorine—a micronutrient element for higher plants**. *Plant Physiol.* 29, 526–532. doi: 10.1104/pp.29.6.526

CHAKRABORTY, S., ROY, S., BHATTACHARYA, A., and MAJUMDER, A. L. (2024). **Exploring aluminum tolerance mechanisms in plants**. *Plants* 13, 1760. doi: 10.3390/plants13131760

COLMENERO-FLORES, J. M., FRANCO-NAVARRO, J. D., CUBERO-FONT, P., PEINADO-TORRUBIA, P., and ROSALES, M. A. (2019). **Chloride as a beneficial macronutrient in higher plants**. *Plant Cell Environ.* 42, 2333–2349. doi: 10.1111/pce.13553

DEUS, J. A. L., NEVES, J. C. L., CORRÊA, M. C. M., PARENT, L. E., NATALE, W., and SILVA, J. T. A. (2018). **Balance design for robust foliar nutrient diagnosis in ‘Prata’ banana**. *Sci. Rep.* 8, 15010. doi: 10.1038/s41598-018-33364-0

GEILFUS, C. M. (2018). **Chloride: from nutrient to toxicant**. *Plant Cell Physiol.* 59, 877–886. doi: 10.1093/pcp/pcy071

KAISER, H. F. (1960). **The Application of Electronic Computers to Factor Analysis**. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 141-151. <http://dx.doi.org/10.1177/001316446002000116>.

KOCHIAN, L. V., PIÑEROS, M. A., LIU, J., and MAGALHAES, J. V. (2015). **Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance**. *Annu. Rev. Plant Biol.* 66, 571–598. doi: 10.1146/annurev-arplant-043014-114822

MAATHUIS, F. J. M. (2014). **Sodium in plants: perception, signalling, and regulation of sodium fluxes**. *J. Exp. Bot.* 65, 849–858. doi: 10.1093/jxb/ert326

- PARENT, L. E., and DAFIR, M. (1992). **A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis**. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 117, 239–242.
- PARENT, L. E., NATALE, W., AND ZIADI, N. (2013). **Compositional nutrient diagnosis of crop nutrition**. *Agron. J.* 105, 1831–1840. doi: 10.2134/agronj2013.0121
- POSCHENRIEDER, C., GUNSÉ, B., CORRALES, I., AND BARCELÓ, J. (2008). **A glance into aluminum toxicity and resistance in plants**. *Sci. Total Environ.* 400, 356–368. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.06.003
- SARRAF, M., VISHWAKARMA, K., KUMAR, V., ARIF, N., DASGUPTA, S., JOHNSON, R., et al. (2023). **Understanding the role of beneficial elements in plants: recent advances and future perspectives**. *Plant Stress* 7, 100132. doi: 10.1016/j.stress.2023.100132
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- WALWORTH, J. L., and SUMNER, M. E. (1987). **The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS)**. *Adv. Soil Sci.* 6, 149–188. doi: 10.1007/978-1-4612-4682-4_4
- WADT, P. G. S. (1996). **Os métodos da chance matemática e do Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) na avaliação nutricional de plantios de eucalipto**. PhD Thesis, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brazil, 123 pp.