TEOR DE MANGANÊS, ZINCO E FERRO EM POSIÇÕES FOLIARES DE MUDAS DE CAFÉ ARÁBICA

Francisco Remigio Cano-Macías, João Paulo de Morais Oliveira, Sônia Maria da Silva, Marcelo Antônio Tomaz, Elias Terra Werner, Milene Miranda Praça Fontes.

Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Alto Universitário, S/N, Guararema, 29500-000 - Alegre - ES, Brasil, Frannk_88@hotmail.com, joaopaulo.ueg@gmail.com, soniamsquimica@gmail.com, tomazamarcelo@yahoo.com.br, elias.werner@ufes.br, milenemiranda@yahoo.com.br.

Resumo

A distribuição de micronutrientes entre posições foliares é relevante para a diagnose nutricional de *Coffea arabica L.* Este estudo avaliou manganês (Mn), zinco (Zn) e ferro (Fe) em três pares de folhas de mudas de Arábica 785/10 Catucaí Vermelho, em delineamento inteiramente casualizado, com três posições e três repetições. Apenas o Fe diferiu significativamente, com maior teor no primeiro par (340,02 mg kg^{-1}) e redução de 61,06% até o terceiro, enquanto Mn e Zn não diferiram. A correlação de Pearson indicou associação negativa moderada entre Mn e Fe (r = -0,60) e ausência de associações expressivas de Zn com os demais micronutrientes. Os resultados indicam maior influência da posição foliar sobre o Fe e menor variação posicional de Mn e Zn, reforçando a importância de considerar o micronutriente na definição da amostragem foliar.

Palavras-chave: *Coffea arabica*. Diagnose foliar. Micronutrientes. Propagação. Viveiro.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias / Agronomia.

Introdução

O café arábica (*Coffea arabica L.*) se consolida como a espécie de maior relevância econômica na indústria cafeeira global, contribuindo com aproximadamente 56% da produção mundial de café (Partelli; Vieira, 2024). No Brasil, principal produtor e exportador, a produtividade da cultura está intrinsecamente ligada à interação de fatores genéticos, ambientais e de manejo, destacando-se a nutrição mineral como um dos determinantes críticos do desempenho agronômico (Viçosi *et al*., 2023; Choque-Incaluque *et al*., 2026). Nesse cenário, a análise foliar tem se consolidado como uma ferramenta indispensável para o monitoramento do estado nutricional, permitindo o diagnóstico de desequilíbrios e fundamentando as estratégias de fertilização (Souza, 2010).

Apesar de serem requeridos em menores quantidades, os micronutrientes desempenham funções vitais no metabolismo vegetal, participando ativamente de processos enzimáticos, fotossintéticos e respiratórios, bem como da regulação do crescimento (Sidhu *et al*., 2019). Elementos como boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) atuam como cofatores catalíticos, ativadores enzimáticos ou componentes estruturais de proteínas, sendo essenciais para a manutenção do funcionamento celular (Hänsch; Mendel, 2009).

A dinâmica dos nutrientes dentro da planta é um processo complexo que envolve a absorção, o transporte, o acúmulo e a redistribuição entre os tecidos (Marschner, 2012). Após serem absorvidos, os nutrientes são transportados principalmente pelo xilema, enquanto sua redistribuição entre diferentes órgãos e tecidos está relacionada à capacidade de transporte pelo floema e às propriedades fisiológicas e físico-químicas de cada elemento (White, 2012). Essas características contribuem para diferenças na distribuição e no acúmulo dos nutrientes entre folhas de diferentes estádios fisiológicos (Etienne *et al*., 2018; Page; Feller, 2015).

Em estudos prévios com *C. arabica*, Zabini *et al*. (2021) observaram diferenças nos teores foliares de micronutrientes, destacando-se Cu, Fe e Mn, cujas concentrações nas folhas apresentaram relações significativas com aquelas observadas nas flores. De forma complementar, Carvalho *et al*. (2017) identificaram variabilidade espacial e temporal nos teores foliares de B, Cu, Fe, Mn e Zn, indicando que suas concentrações podem variar conforme o local e a época de amostragem. Silva *et al*. (2022), por sua vez, demonstraram que a concentração desses micronutrientes varia entre folhas jovens,

diagnósticas, senescentes e decíduas, evidenciando a influência do estádio fisiológico foliar sobre sua distribuição.

Apesar desses estudos, ainda são necessários dados sobre a distribuição de micronutrientes entre diferentes posições foliares durante os estádios iniciais de desenvolvimento de *C. arabica*, período caracterizado pela expansão de novos tecidos e elevada demanda nutricional. Nesse contexto, o presente estudo avaliou os teores foliares de Mn, Zn e Fe em diferentes posições foliares de mudas de *C. arabica*, buscando caracterizar a variação desses micronutrientes ao longo do gradiente de posição foliar durante o estádio inicial de desenvolvimento.

Metodologia

O material vegetal utilizado consistiu em mudas de *C. arabica* (var. Arábica 785/10 Catucaí Vermelho) com quatro meses de idade, oriundas de um viveiro comercial situado na zona rural de Ibitirama, Espírito Santo. Neste estudo, o foco recaiu sobre os teores foliares de Mn, Zn e Fe do ramo ortotrópico. A amostragem contemplou três posições de par de folhas totalmente expandidas, basal (folhas mais velhas), intermediária e apical (folhas mais jovens, já expandidas), com três repetições; cada repetição correspondeu a uma amostra composta, obtida reunindo-se o par de folhas de dez mudas na posição correspondente. Os resultados foram expressos em mg kg^{-1} de matéria seca.

Após a coleta, as folhas foram acondicionadas em sacos de papel devidamente identificados e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 ± 2 °C até atingirem massa constante, sendo em seguida trituradas em moinho tipo Wiley equipado com peneira de aço inoxidável de 0,42 mm e armazenadas para as análises químicas. Os teores de manganês (Mn), zinco (Zn) e ferro (Fe) foram determinados após digestão nítrico-perclórica (3:1) das amostras vegetais, segundo metodologia adaptada de Malavolta *et al*. (1997). Aproximadamente 0,5 g do material vegetal previamente seco e moído foi transferido para tubos de digestão, aos quais foram adicionados 6 mL da solução nítrico-perclórica; as amostras permaneceram em repouso por, no mínimo, 12 horas para pré-digestão da matéria orgânica. Em seguida, os tubos foram aquecidos em bloco digestor, inicialmente a 120 °C por cerca de 30 minutos, para controlar a liberação de vapores, e depois a temperaturas entre 180 e 200 °C até a redução do volume e clarificação completa da solução. Após o resfriamento, o volume de cada amostra foi ajustado para 50 mL com água destilada deionizada, seguido de homogeneização.

Para a quantificação de Mn, Zn e Fe, foram preparadas curvas-padrão específicas para cada elemento, utilizando soluções de referência de concentração conhecida, obtidas a partir de padrões analíticos certificados. As curvas foram construídas com, no mínimo, cinco pontos de concentração, cobrindo a faixa esperada nos extratos das amostras, sendo os três elementos quantificados por espectrometria de absorção atômica.

Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado, tomando a posição foliar como único fator, distribuído em três níveis (primeiro, segundo e terceiro pares) e três repetições. Antes de interpretar a análise de variância, checou-se a adequação do modelo por meio dos testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos) e de Levene e Bartlett (homogeneidade de variâncias), além da independência garantida pela casualização. Onde o teste F indicou efeito significativo ($p < 0,05$), aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparar as médias, complementado pela construção da matriz de correlação de Pearson entre os teores foliares dos micronutrientes. O processamento dos dados foi feito em Python, com as bibliotecas SciPy, Statsmodels, Pandas e Matplotlib.

Resultados

A análise de variância revelou efeito significativo da posição foliar apenas para os teores de Fe (Tabela 1). Para esse nutriente, foi observada diferença estatística entre as posições foliares ($F = 9,911$; $p = 0,0125$), indicando que a posição foliar influenciou significativamente sua concentração.

Em contrapartida, não foram detectadas diferenças significativas para os teores de Mn e Zn ($p > 0,05$). O Mn apresentou uma tendência de variação entre as posições foliares, com aumento dos teores em direção ao terceiro par de folhas ($F = 4,665$; $p = 0,0600$), embora esse resultado não tenha sido suficiente para rejeitar a hipótese nula ao nível de 5% de probabilidade. Para o Zn, não foi observada tendência consistente entre as posições foliares ($F = 1,361$; $p = 0,3256$).

Tabela 1 - Análise de variância dos teores foliares de Mn, Zn e Fe em diferentes posições foliares de *C. arabica*.

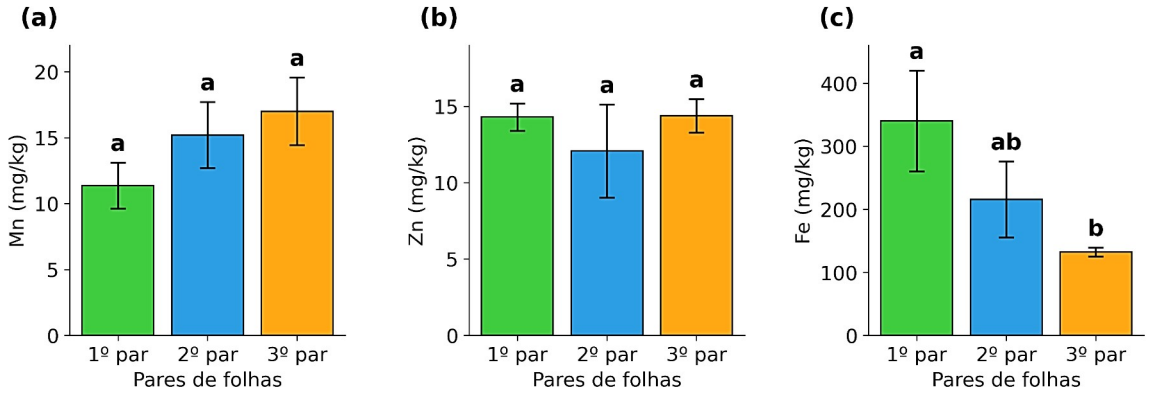
Variável	Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	p-valor
Mn	Posição foliar	2	49,7867	24,8933	4,665	0,0600 ns
	Resíduo	6	32,0165	5,3361		
	Total	8	81,8032			
Zn	Posição foliar	2	10,1466	5,0733	1,361	0,3256 ns
	Resíduo	6	22,3714	3,7286		
	Total	8	32,5180			
Fe	Posição foliar	2	65.515,2683	32.757,6341	9,911	0,0125 *
	Resíduo	6	19.831,2765	3.305,2128		
	Total	8	85.346,5448			

GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F = valor do teste F. Significância: ns = não significativo (p > 0,05); * = significativo (p < 0,05).

Na comparação das médias (Figura 1), os teores de Mn (11,36-17,00 mg kg^{-1}) e Zn (12,08-14,39 mg kg^{-1}) não apresentaram diferenças significativas entre as posições foliares avaliadas (Figura 1a-b), corroborando os resultados obtidos na análise de variância.

Em contraste, o Fe apresentou diferença significativa entre as posições foliares (Figura 1c). O maior teor foi observado no primeiro par de folhas (340,02 mg kg^{-1}), diferindo significativamente do terceiro par (132,40 mg kg^{-1}), enquanto o segundo par (215,57 mg kg^{-1}) apresentou valor intermediário e não diferiu estatisticamente dos demais. O teor de Fe no primeiro par de folhas foi aproximadamente 2,6 vezes superior ao observado no terceiro par, correspondendo a uma redução de aproximadamente 61% entre essas posições, evidenciando uma distribuição diferencial do Fe entre as posições foliares.

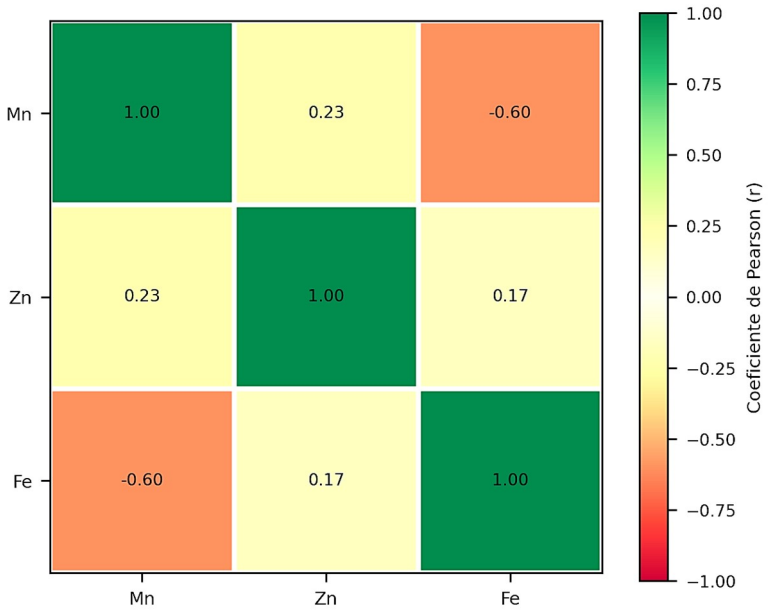
Figura 1 - Teores médios de Mn (a), Zn (b) e Fe (c) em diferentes posições foliares de *C. arabica*. Barras representam média ± desvio-padrão (n = 3). Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05).



Fonte: os autores (2026).

Como análise complementar, foi construída a matriz de correlação de Pearson entre os teores foliares dos três micronutrientes avaliados (Figura 2). Observou-se associação negativa moderada entre Mn e Fe (r = -0,60), enquanto não foram observadas associações lineares expressivas entre Zn e os demais micronutrientes avaliados (|r| < 0,25).

Figura 2 - Matriz de correlação de Pearson entre os teores foliares de Mn, Zn e Fe em diferentes posições foliares de *C. arabica*.



Fonte: os autores (2026).

Discussão

Os resultados demonstraram que apenas o Fe apresentou variação significativa em função da posição foliar, com maior concentração no primeiro par de folhas (340,02 mg kg^{-1}) e menor no terceiro (132,40 mg kg^{-1}), correspondendo a uma redução de 61,06%. Esse gradiente evidencia uma distribuição diferencial do Fe entre folhas de diferentes posições e idades fisiológicas. Em Coffea, a concentração foliar de Fe também apresenta variação associada a diferentes fontes de heterogeneidade. Schmidt *et al*. (2022), ao avaliarem genótipos de *C. canephora*, verificaram que o Fe foi o micronutriente que mais contribuiu para a diferenciação nutricional entre os genótipos, evidenciando a influência do componente genético sobre sua concentração foliar. De forma complementar, Santos *et al*. (2021) observaram variação significativa nos teores foliares de Fe entre diferentes períodos de avaliação e interação entre genótipo e época, demonstrando que sua concentração também responde às condições fisiológicas da planta. Em mudas de *C. arabica*, Gontijo *et al*. (2007) também observaram variação nos teores foliares de Fe entre diferentes estádios de desenvolvimento, reforçando a importância da padronização do estádio de amostragem. Em conjunto, esses resultados demonstram que a concentração foliar de Fe é sensível ao genótipo, período, estádio de desenvolvimento e posição foliar, reforçando a necessidade de padronizar a posição das folhas na amostragem de *C. arabica*.

Por outro lado, os teores de Mn (11,36-17,00 mg kg^{-1}) e Zn (12,08-14,39 mg kg^{-1}) não diferiram significativamente entre as posições foliares avaliadas, indicando reduzida variação desses micronutrientes no gradiente foliar estudado. Para o Mn, esse resultado coincide com o observado por Silva *et al*. (2021) na cultivar 'Red Catuaí IAC 144', na qual não foram detectadas diferenças significativas entre as classes foliares avaliadas, enquanto, para o Zn, o resultado contrasta, pois, nesse estudo, foram observadas maiores concentrações nas folhas jovens. Essa diferença entre os resultados pode estar relacionada às características do gradiente foliar avaliado. Martinez *et al*. (2003) destacam que a composição mineral do cafeeiro pode variar com o estádio vegetativo, a idade da planta e a posição de amostragem, fatores que devem ser considerados na interpretação dos teores foliares.

Conclusão

O presente estudo demonstrou que a posição do par de folhas exerce efeito diferencial sobre os teores de micronutrientes em mudas de *C. arabica*, com variação significativa apenas para o Fe, enquanto Mn e Zn apresentaram distribuição relativamente uniforme entre as posições avaliadas. Esse comportamento evidencia que a influência da posição foliar sobre a concentração de micronutrientes não é uniforme, sendo mais pronunciada para o Fe nas condições estudadas. Assim, a posição foliar

deve ser considerada como componente da amostragem para a diagnose de Fe, enquanto, para Mn e Zn, o gradiente posicional avaliado apresentou efeito limitado, fornecendo subsídios para o aprimoramento da amostragem foliar e da interpretação nutricional de mudas de cafeeiro.

Referências

CARVALHO, L.; SILVA, F.; FERRAZ, G.; FIGUEIREDO, V.; CUNHA, J. Comparação entre amostragem foliar convencional e de precisão para análise de micronutrientes na cafeicultura. **Coffee Science**, v.12, p.272-281, 2017.

CHOQUE-INCALUQUE, E.; CUEVA-CARHUATANTA, C.; CARRERA-ROJO, R.; LOYOLA, J.; HERMOZA-GUTIÉRREZ, M.; CÁNTARO-SEGURA, H.; FERNÁNDEZ-HUAYTALLA, E.; GUTIÉRREZ-REYNOSO, D.; QUISPE-JACOBO, F.; CAPA-RAMIREZ, K. Linking Grain Mineral Content to Pest and Disease Resistance, Agro-Morphological Traits, and Bioactive Compounds in Peruvian Coffee Germplasm. **Horticulturae**, v.12, p.1-15, 2026. DOI: 10.3390/horticulturae12010015.

ETIENNE, P.; DIQUELOU, S.; PRUDENT, M.; SALON, C.; MAILLARD, A.; OURRY, A. Macro and Micronutrient Storage in Plants and Their Remobilization When Facing Scarcity: The Case of Drought. **Agriculture**, v.8, p.1-14, 2018. DOI: 10.3390/agriculture8010014.

GONTIJO, R.; CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R.; MENDES, A.; ANDRADE, W. Faixas críticas de teores foliares de micronutrientes em mudas de cafeeiro (*Coffea arabica L.*). **Coffee Science**, v.2, p.135-141, 2007.

HÄNSCH, R.; MENDEL, R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Current Opinion in Plant Biology**, v.12, p.259-266, 2009. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.05.006.

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

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3.ed. [s.l.] Academic Press, 2012. 651p.

MARTINEZ, H.; MENEZES, J.; SOUZA, R.; ALVAREZ, V.; GUIMARÃES, P. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.703-713, 2003. DOI: 10.1590/S0100-204X2003000600006.

PAGE, V.; FELLER, U. Heavy Metals in Crop Plants: Transport and Redistribution Processes on the Whole Plant Level. **Agronomy**, v.5, p.447-463, 2015. DOI: 10.3390/agronomy5030447.

PARTELLI, F.; VIEIRA, H. Coffee Breeding and Stress Biology. **Plants**, v.13, p.1-4, 2024. DOI: 10.3390/plants13141912.

SANTOS, M.; SILVA, C.; OZA, E.; GONTIJO, I.; AMARAL, J.; PARTELLI, F. Concentration of Nutrients in Leaves, Flowers, and Fruits of Genotypes of *Coffea canephora*. **Plants**, v.10, p.1-19, 2021. DOI: 10.3390/plants10122661.

SCHMIDT, R.; SILVA, C.; DUBBERSTEIN, D.; DIAS, J.; VIEIRA, H.; PARTELLI, F. Genetic Diversity Based on Nutrient Concentrations in Different Organs of Robusta Coffee. **Agronomy**, v.12, p.1-18, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12030640.

SIDHU, M.; RATURI, H.; KACHWAYA, D.; SHARMA, A. Role of micronutrients in vegetable production: A review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v.8, p.332-340, 2019.

SILVA, C.; CAVALCANTE, A.; FRANCO, M.; FARINA, P.; ANDRADE, G.; AQUINO, L. Retranslocation of nutrients in coffee leaves of cultivars Red Catuai IAC 144 and IAC 125 RN. **Australian Journal of Crop Science**, v.15, p.586-593, 2021. DOI: 10.3316/informit.723009515702591.

SILVA, C.; SILVA, L.; BARBOSA, G.; FRANCO, M.; DELGADO, E.; FARIÑA, P.; AQUINO, L. Diagnosis of the nutritional status of coffee tree according to fruit phenology. **Research, Society and Development**, v.11, p.1-13, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i6.28591.

SOUZA, T. **Monitoramento do estado nutricional de plantas cítricas e da solução do solo em sistema de fertirrigação**. 2010. 146p. Tese (Doutor em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, São Paulo, Brasil.

VIÇOSI, D.; ZANDONADI, C.; GUARÇONI, R.; MARTINUZZO, M.; ALIXANDRE, F.; KROHLING, C.; FERREIRA, C.; SANTOS, V.; DE PAULA, E.; FORNAZIER, M. Importância da melhoria da qualidade do café arábica para a sustentabilidade de propriedades agrícolas. **INCAPER em Revista**, v.13, p.57-70, 2023. DOI: 10.54682/ier.v.13e14.p57.70.

WHITE, P. **Chapter 3 - Long-distance Transport in the Xylem and Phloem**. Em: MARSCHNER, P. (Ed.). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition). San Diego: Academic Press, 2012. p.49-70. DOI: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00003-0.

ZABINI, A.; MARTINEZ, H.; NEVES, J.; CRUZ, C.; VALADARES, S. Chemical analyses of flowers and leaves for nutritional diagnoses of coffee trees. **Ciência Rural**, v.51, p.1-7, 2021. DOI: 10.1590/0103-8478cr20190796.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Grupo de Cooperação Internacional de Universidades Brasileiras (GCUB), à Organização dos Estados Americanos (OEA), à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento da UFES/Alegre e ao Laboratório de Citogenética e Cultura de Tecidos Vegetais da UFES/Alegre pelo apoio financeiro, infraestrutura e recursos fornecidos para a realização deste estudo.