MANGANÊS, ZINCO E FERRO EM MUDAS DE CAFEEIRO CONILON

João Paulo de Morais Oliveira, Sônia Maria da Silva, Elias Terra Werner, Marcelo Antônio Tomaz, 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, joaopaulo.ueg@gmail.com, soniamsquimica@gmail.com, elias.werner@ufes.br, tomazamarcelo@yahoo.com.br, milenemiranda@yahoo.com.br.

Resumo

Manganês (Mn), zinco (Zn) e ferro (Fe) cumprem funções metabólicas centrais no cafeeiro, e seus teores foliares podem variar conforme a posição do par de folhas amostrado. Este trabalho avaliou os teores foliares desses três micronutrientes em mudas de cafeeiro Conilon (*Coffea canephora*), comparando-se o primeiro, o segundo e o terceiro pares de folhas do ramo ortotrópico, em delineamento inteiramente casualizado com três repetições. Os três micronutrientes responderam significativamente à posição foliar, porém em sentidos opostos: o Mn aumentou progressivamente da folha mais velha para a mais nova, enquanto Zn e Fe decresceram no mesmo sentido, com o teor de Fe já diferindo a partir do segundo par (redução superior a 55% do primeiro para o terceiro par, 420,72 para 183,15 mg kg^{-1}) e o Zn com queda próxima de 65% entre os mesmos pares. A correlação de Pearson confirmou esse padrão: associação forte e positiva entre Zn e Fe (r = 0,82) e associações negativas entre o Mn e os demais elementos (r = -0,80 com o Fe; r = -0,58 com o Zn). Conclui-se que, em mudas de cafeeiro Conilon, a posição do par de folhas deve ser rigorosamente padronizada para a diagnose de Mn, Zn e Fe, dado o efeito consistente e de sentido oposto observado entre esses micronutrientes.

Palavras-chave: *Coffea canephora*. Diagnose Foliar. Micronutrientes. Nutrição de Plantas. Propagação.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias / Agronomia.

Introdução

O café Conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) figura entre as cultivares de maior peso econômico dentro da espécie, cultivado principalmente em regiões de menor altitude e temperaturas mais elevadas, onde se adapta melhor do que o café arábica (Partelli & Vieira, 2024). O desempenho dessa lavoura depende da interação entre fatores genéticos, ambientais e de manejo, entre os quais a nutrição mineral ocupa papel central (Viçosi et al., 2023; Choque-Incaluque et al., 2026). Nesse contexto, a análise foliar consolidou-se como ferramenta de referência para acompanhar o estado nutricional das plantas, apontar desequilíbrios e orientar decisões de adubação (Souza, 2010).

Embora exigidos em quantidades bem menores que os macronutrientes, B, Cu, Fe, Mn e Zn são indispensáveis ao funcionamento da planta, atuando em reações enzimáticas, na fotossíntese, na respiração celular e na regulação do crescimento (Sidhu et al., 2019). Boa parte dessas funções decorre de sua atuação como cofatores catalíticos, ativadores enzimáticos ou componentes estruturais de proteínas — papéis que tornam sua presença, mesmo em concentrações reduzidas, condição essencial à homeostase celular (Hänsch & Mendel, 2009).

Uma vez absorvidos pelas raízes, os nutrientes seguem majoritariamente pelo xilema até os órgãos aéreos; a partir daí, sua capacidade de migrar ainda mais — redistribuindo-se entre tecidos de diferentes idades — depende do quanto conseguem circular pelo floema, o que varia de elemento para elemento conforme suas propriedades físico-químicas (Marschner, 2012; White, 2012). É essa combinação entre a via inicial de transporte e a mobilidade floemática subsequente que explica, em boa parte, por que a concentração de um mesmo nutriente pode diferir tanto entre folhas em estádios fisiológicos distintos (Etienne et al., 2018; Page & Feller, 2015).

Em estudos prévios com *C. canephora*, verificou-se que os teores foliares de micronutrientes variam conforme o órgão e o genótipo avaliados: Schmidt et al. (2022) constataram que o Fe foi o elemento que mais contribuiu para diferenciar nutricionalmente genótipos de café Robusta, e Dos Santos et al.

(2021) registraram concentrações distintas de Mn, Zn e Fe entre folhas, flores e frutos dentro da espécie.

Apesar desses avanços, ainda faltam dados sobre como a posição do par de folhas afeta a distribuição desses micronutrientes nos estádios iniciais de desenvolvimento de *C. canephora*, fase marcada por intensa expansão de tecidos e alta demanda nutricional. Assim, o presente estudo caracterizou os teores foliares de Mn, Zn e Fe em diferentes posições foliares de mudas de *C. canephora*, buscando subsidiar a definição de um protocolo de amostragem foliar mais preciso para essa cultivar.

Metodologia

O material vegetal consistiu em folhas de mudas de cafeeiro Conilon, clone A_1, coletadas em três posições ao longo do ramo ortotrópico: primeiro par (folha basal, mais velha), segundo par (posição intermediária) e terceiro par (folha apical, mais nova). Em cada posição foliar, avaliaram-se três mudas individuais, cada uma considerada uma repetição, totalizando nove unidades amostrais; em cada repetição, o par de folhas correspondente foi analisado como subamostra, e os teores 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 60 ± 2 °C até atingirem massa constante. Em seguida, o material foi moído em moinho tipo Wiley, equipado com peneira de aço inoxidável de 0,42 mm, e armazenado até a realização das análises químicas.

Os teores de Mn, Zn e Fe foram determinados após digestão nítrico-perclórica (3:1) das amostras vegetais, conforme metodologia adaptada de Malavolta et al. (1997). Cerca de 0,5 g do material previamente seco e moído foi transferido para tubos de digestão, aos quais se adicionaram 6 mL da solução nítrico-perclórica; as amostras permaneceram em repouso por, no mínimo, 12 horas, para pré-digestão da matéria orgânica. Os tubos foram então aquecidos em bloco digestor, inicialmente a 120 °C por cerca de 30 minutos, para controlar a liberação de vapores, e, em seguida, entre 180 e 200 °C, até a redução do volume e o completo clareamento da solução. Após o resfriamento, o volume de cada amostra foi completado para 50 mL com água destilada deionizada, seguido de homogeneização.

Para a quantificação dos três micronutrientes, foram preparadas curvas-padrão específicas para cada elemento, a partir de soluções de referência de concentração conhecida, obtidas de padrões analíticos certificados, com pelo menos cinco pontos de concentração cobrindo a faixa esperada nos extratos das amostras; a leitura foi realizada por espectrometria de absorção atômica.

A interpretação dos teores foliares baseou-se nas faixas de referência para micronutrientes em cafeeiro (Mn, Zn e Fe), adaptadas de Malavolta (1992), Prezotti et al. (2007) e Prezotti e Guarçoni (2013).

Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com a posição do par de folhas como único fator, em três níveis e três repetições. Para cada micronutriente, ajustou-se um modelo de análise de variância (one-way), cujos pressupostos foram verificados antes da interpretação: normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, complementada por inspeção gráfica dos quantis, e homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene centrado na mediana (variante de Brown-Forsythe), com o teste de Bartlett como checagem adicional; a independência das observações foi garantida pelo próprio delineamento casualizado. Sempre que o teste F indicou efeito significativo ($p \leq 0,05$), as médias foram desdobradas pelo teste de Tukey (HSD) ao mesmo nível de significância, e calculou-se o coeficiente de variação experimental para cada variável. Como análises complementares, construiu-se a matriz de correlação de Pearson entre os três micronutrientes e um gráfico de perfil relativo (radar) por posição foliar. Todo o processamento foi realizado em Python, com as bibliotecas SciPy e statsmodels.

Resultados

A análise de variância revelou efeito significativo da posição do par de folhas para os três micronutrientes avaliados (Tabela 1): manganês ($F = 9,966$; $p = 0,0124$), zinco ($F = 6,277$; $p = 0,0338$) e ferro ($F = 21,477$; $p = 0,0018$), este último a menos de 1% de probabilidade.

Chamou atenção o sentido oposto das respostas entre os elementos: o Mn foi mais concentrado na folha mais nova (terceiro par), ao passo que o Zn e o Fe seguiram trajetória inversa, com teores

decrescentes da folha mais velha para a mais nova — padrão detalhado no desdobramento do teste de Tukey (item seguinte) e discutido à luz das correlações entre os três micronutrientes.

Tabela 1 - Análise de variância dos teores foliares de Mn, Zn e Fe em diferentes posições foliares em mudas de cafeeiro Conilon.

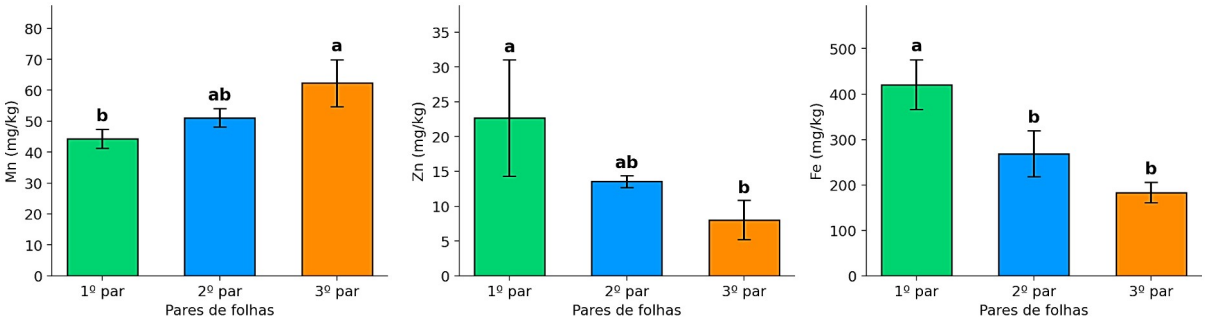
Variável	Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	p-valor
Mn	Posição foliar	2	499,0255	249,5127	9,966	0,0124 *
	Resíduo	6	150,2249	25,0375		
	Total	8	649,2504			
Zn	Posição foliar	2	329,1085	164,5542	6,277	0,0338 *
	Resíduo	6	157,2983	26,2164		
	Total	8	486,4068			
Fe	Posição foliar	2	86.901,7478	43.450,8739	21,477	0,0018 *
	Resíduo	6	12.138,6244	2.023,1041		
	Total	8	99.040,3722			

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).

O teor de Mn variou de 44,26 mg kg⁻¹ no primeiro par a 62,32 mg kg⁻¹ no terceiro (aumento de aproximadamente 41%), com diferença estatística confirmada entre esses extremos pelo teste de Tukey, enquanto o segundo par (51,06 mg kg⁻¹) não diferiu de nenhum dos dois (Figura 1a). O Zn seguiu direção oposta: caiu de 22,69 mg kg⁻¹ no primeiro par para 8,02 mg kg⁻¹ no terceiro — redução próxima de 65% —, também com diferença significativa restrita aos extremos, já que o segundo par (13,54 mg kg⁻¹) ocupou posição intermediária sem diferir estatisticamente de nenhum deles (Figura 1b).

O Fe apresentou o padrão mais nítido entre os três micronutrientes (Figura 1c): partindo de 420,72 mg kg⁻¹ no primeiro par, o teor caiu para 268,45 mg kg⁻¹ no segundo e 183,15 mg kg⁻¹ no terceiro, com o primeiro par diferindo estatisticamente tanto do segundo quanto do terceiro, que por sua vez não diferiram entre si. Essa redução superior a 55% entre o primeiro e o terceiro par, já detectável a partir do segundo, evidencia uma queda mais precoce e acentuada do Fe do que a observada para os demais micronutrientes.

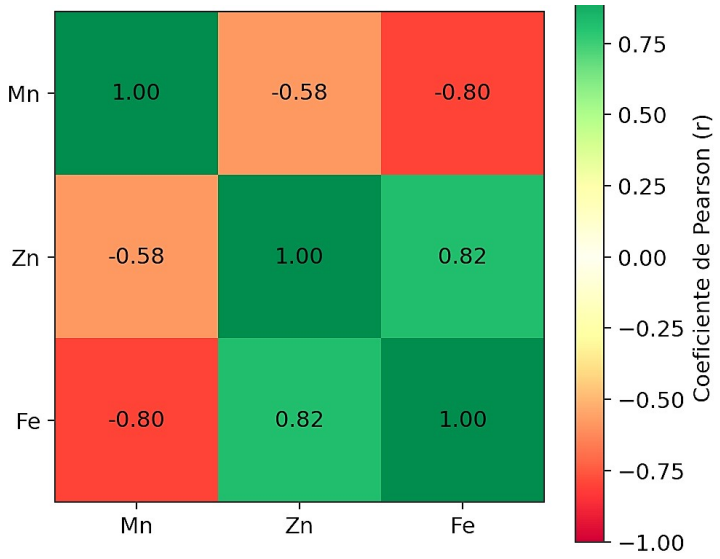
Figura 1 - Teores médios de Mn (a), Zn (b) e Fe (c) em diferentes posições foliares de mudas de cafeeiro Conilon. Barras representam média ± desvio-padrão (n = 3). Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05).



Fonte: os autores.

Como análise complementar, foi construída a matriz de correlação de Pearson entre os teores foliares dos três micronutrientes avaliados (Figura 2). Observou-se associação positiva forte entre Zn e Fe (r = 0,82), consistente com o declínio conjunto de ambos da folha mais velha para a mais nova, e associações negativas entre o Mn e os demais elementos — forte com o Fe (r = -0,80) e moderada a forte com o Zn (r = -0,58) —, refletindo a trajetória oposta do Mn em relação aos outros dois micronutrientes.

Figura 2 - Matriz de correlação de Pearson entre os teores foliares de Mn, Zn e Fe em diferentes posições foliares de mudas de cafeeiro Conilon.



Fonte: os autores.

Discussão

O Fe apresentou o padrão mais nítido dos três micronutrientes, com concentração máxima na folha mais velha (420,72 mg kg^{-1}) e mínima na mais nova (183,15 mg kg^{-1}) — comportamento coerente com a baixíssima mobilidade desse elemento pelo floema, que, uma vez incorporado ao tecido, dificilmente é redistribuído para as folhas em expansão (Marschner, 2012; White, 2012). O Zn seguiu trajetória semelhante, ainda que menos acentuada, com queda próxima de 65% entre o primeiro e o terceiro par; a forte correlação positiva entre os dois elementos (r = 0,82) reforça que compartilham um padrão de acúmulo preferencial nas folhas mais velhas. Em *C. canephora*, essa variação nos teores foliares de micronutrientes também responde a fatores genéticos: Schmidt et al. (2022) verificaram que o Fe foi o elemento que mais contribuiu para diferenciar nutricionalmente genótipos de café Robusta, e Dos Santos et al. (2021) registraram variação de Fe entre órgãos e ao longo do desenvolvimento da planta. Em conjunto, esses achados sugerem que, além do genótipo e do estádio de desenvolvimento, a posição do par de folhas responde por parcela relevante da variação nos teores foliares de Fe.

Diferentemente do Fe e do Zn, o Mn foi mais concentrado na folha mais nova (62,32 mg kg^{-1}) do que na mais velha (44,26 mg kg^{-1}), padrão que não acompanha o comportamento mais comumente descrito para esse elemento na literatura, geralmente associado a acúmulo progressivo em tecidos mais velhos, à semelhança do cálcio (Marschner, 2012). Esse resultado pode refletir diferenças na taxa de absorção radicular e no transporte via xilema durante o período de expansão foliar mais ativo, ou ainda um efeito de concentração ligado à menor massa seca relativa da folha ainda em formação; são necessárias investigações adicionais para esclarecer o mecanismo por trás desse comportamento em mudas de cafeeiro Conilon. As correlações negativas entre o Mn e os demais elementos (r = -0,80 com o Fe; r = -0,58 com o Zn) reforçam estatisticamente essa trajetória oposta: a transição da folha mais velha para a mais nova está associada a um gradiente consistente de acúmulo de Mn e de perda de Zn e Fe. Do ponto de vista prático, esse comportamento divergente entre os três micronutrientes reforça que a padronização da posição do par de folhas é indispensável para a diagnose foliar em mudas de cafeeiro Conilon, já que a escolha de uma posição inadequada pode levar a diagnósticos contraditórios conforme o elemento de interesse.

Conclusão

Em mudas de cafeeiro Conilon, a posição do par de folhas amostrado influenciou significativamente os teores foliares dos três micronutrientes avaliados, porém em sentidos opostos: o Mn aumentou da folha mais velha para a mais nova, ao passo que o Zn e, sobretudo, o Fe apresentaram queda

acentuada no mesmo sentido, com o Fe já diferindo estatisticamente a partir do segundo par. Esse comportamento divergente, corroborado pelas correlações fortes entre os elementos, mostra que a padronização da posição foliar é indispensável para a diagnose de Mn, Zn e Fe nessa cultivar, já que a escolha do par de folhas amostrado pode alterar substancialmente — e em direções opostas — o diagnóstico nutricional obtido. Recomenda-se, portanto, fixar rigorosamente essa posição nos protocolos de amostragem foliar destinados ao monitoramento nutricional de mudas de cafeeiro Conilon.

Referências

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.

DOS SANTOS, M.; DA SILVA, C.; OZA, E.; GONTIJO, I.; DO 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.

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.

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. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1992.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **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. San Diego: Academic Press, 2012. 651 p.

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.

PREZOTTI, L. C.; GOMES, J. A.; DADALTO, G. G.; OLIVEIRA, J. A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo - 5ª aproximação**. Vitória: SEEA/INCAPER/CEDAGRO, 2007.

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, M. A. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória: Incaper, 2013.

SCHMIDT, R.; DA 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.

SOUZA, T. **Monitoramento do estado nutricional de plantas cítricas e da solução do solo em sistema de fertirrigação**. 2010. 146 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2010.

VIÇOSI, D.; ZANDONADI, C.; GUARÇONI, R.; MARTINUZZO, M.; ALIXANDRE, F.; KROHLING, C.; FERREIRA, C.; DOS 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. Long-distance transport in the xylem and phloem. *In*: MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012. p. 49-70. DOI: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00003-0.

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), 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.