BORO, MANGANÊS E COBALTO EM MUDAS DE LIMOEIRO 'CRAVO' CULTIVADAS COM LODO DE CURTUME

Tacisio Nunes Tudéia[1], Silvio de Jesus Freitas[1], Sávio da Silva Berilli[2], Osvaldo Sebastião de Oliveira Filho[1], Paulo Cesar dos Santos[3], Júlio Cézar da Silva Rosário[3], João Vitor Magalhães de Oliveira[3].

[1]Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Avenida Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia - 28013-602 - Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil. tacisiocops@hotmail.com, silvio@uenf.br, osvaldoosof@yahoo.com.br.
[2]Instituto Federal do Espírito Santo, Campus de Alegre, Alegre-ES, Brasil. savio.berilli@ifes.edu.br.
[3]Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Departamento de Agronomia, Alto Universitário, s/n, Guararema - 29500-000 - Alegre-ES, Brasil. paulo.santos.43@ufes.br, julio.rosario.agro@gmail.com, jv.magalhaesdeoliveira@gmail.com.

Resumo

Objetivou-se avaliar o efeito de proporções crescentes de lodo de curtume desidratado no substrato sobre os teores de boro, manganês e cobalto na parte aérea de mudas de limoeiro 'Cravo' (*Citrus limonia* Osbeck). Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados, com oito tratamentos constituídos por 0; 0,5; 1; 3; 5; 10; 30 e 50% de lodo de curtume e quatro repetições. Aos 45 dias após o transplantio, determinou-se a composição mineral da parte aérea. O boro aumentou linearmente e passou de 38 mg kg^{-1}, na testemunha, para 506 mg kg^{-1}, com 50% do resíduo. Nas maiores proporções, observaram-se queima marginal e áreas necróticas nas folhas. O manganês apresentou resposta quadrática e diminuiu de aproximadamente 21 para 10,5 mg kg^{-1} entre a ausência e a maior proporção de lodo. O cobalto apresentou resposta quadrática de pequena amplitude e manteve valores próximos ao observado na testemunha. Concluiu-se que o lodo modificou intensamente o equilíbrio entre boro, manganês e cobalto nas mudas, com acúmulo excessivo de boro, redução de manganês e pequena variação de cobalto.**Palavras-chave**: *Citrus limonia*. Boro. Manganês. Cobalto. Resíduo industrial.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias - Agronomia.

Introdução

O aproveitamento de resíduos industriais na agricultura pode contribuir para a reciclagem de matéria orgânica e elementos minerais, além de reduzir o volume de materiais destinados ao descarte. O lodo de curtume apresenta potencial para utilização como componente de substratos devido à presença de matéria orgânica e nutrientes, sendo sua aplicação em diferentes culturas avaliada como alternativa ao uso de substratos convencionais (Berilli *et al.,* 2014; Dietrich *et al.,* 2020). Entretanto, a composição do resíduo pode alterar as características químicas do meio de cultivo, especialmente o pH e a disponibilidade de elementos minerais, podendo resultar em desequilíbrios nutricionais nas plantas (Konrad; Castilhos, 2002; Borges *et al.,* 2007).

O boro (B) participa da formação e estabilidade da parede celular, da integridade das membranas e do metabolismo de carboidratos. Apesar de essencial, os citros apresentam faixa relativamente estreita entre a deficiência e a toxicidade por B, de modo que o aumento excessivo de sua disponibilidade pode comprometer o crescimento e o funcionamento fisiológico das plantas (Malavolta; Violante Netto, 1989; Yang *et al.,* 2023). Em citros submetidos a concentrações elevadas de B, já foram observados aumento do acúmulo do elemento nas folhas, clorose, necrose e redução do crescimento, evidenciando a sensibilidade dessas plantas ao excesso do micronutriente (Guo *et al.,* 2014; Luo *et al.,* 2024). Dessa forma, a elevação da disponibilidade de B no substrato constitui um aspecto relevante na avaliação do uso de resíduos na produção de mudas cítricas.

O manganês (Mn) atua como cofator enzimático e participa de processos fundamentais da fotossíntese, sendo sua disponibilidade influenciada pelas características químicas do meio. Em condições de maior pH, a disponibilidade de Mn tende a diminuir em razão das alterações na solubilidade e na formação de formas menos disponíveis às plantas (Alejandro *et al.,* 2020).

Considerando que a aplicação de lodo de curtume pode modificar o pH do substrato, essa alteração pode interferir diretamente na disponibilidade e na absorção do Mn pelas mudas (Konrad; Castilhos, 2002). O cobalto (Co), por sua vez, é requerido em concentrações muito baixas e apresenta papel particularmente relacionado à fixação biológica de nitrogênio, embora seus efeitos sobre as plantas superiores e sua essencialidade ainda sejam objeto de discussão (Hu *et al.,* 2021). Assim, alterações nas características químicas do substrato podem modificar a disponibilidade desses micronutrientes e, consequentemente, seus teores nos tecidos vegetais.

Nesse contexto, a avaliação dos teores de B, Mn e Co permite caracterizar diferentes respostas nutricionais à utilização de lodo de curtume como componente do substrato. Estudos com resíduos de curtume demonstram que a resposta das plantas aos elementos minerais presentes no resíduo não ocorre de forma uniforme, podendo haver aumento de determinados elementos e redução ou pouca alteração de outros (Borges *et al.,* 2007). Portanto, a caracterização do estado nutricional das mudas é necessária para avaliar a adequação das proporções utilizadas e identificar possíveis desequilíbrios decorrentes da incorporação do resíduo ao substrato.

Assim, objetivou-se avaliar os teores de B, Mn e Co na parte aérea de mudas de limoeiro ‘Cravo’ cultivadas em substratos contendo proporções crescentes de lodo de curtume desidratado.

Metodologia

O experimento foi conduzido em ambiente protegido no Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Itapina, em Colatina, Espírito Santo. As mudas foram produzidas em tubetes de 50 cm³ contendo substrato comercial. Aos 84 dias após a semeadura, plantas uniformes, com 10 a 15 cm de altura, foram transplantadas para sacolas de polietileno.

Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados, com oito tratamentos e quatro repetições. Cada unidade experimental foi composta por oito mudas. A testemunha foi constituída por 79,5% de terra de barranco, 19,5% de esterco bovino curtido, 0,55% de superfosfato simples, 0,15% de cloreto de potássio e 0,2% de calcário dolomítico. Nos demais tratamentos, 0,5; 1; 3; 5; 10; 30 ou 50% dessa mistura foram substituídos por lodo de curtume desidratado.

Aos 45 dias após o transplantio, coletaram-se quatro mudas por unidade experimental. A parte aérea foi separada das raízes, seca em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C por 72 horas e moída. Após digestão com ácido nítrico e peróxido de hidrogênio, os teores de B, Mn e Co foram determinados por espectrometria de emissão por plasma.

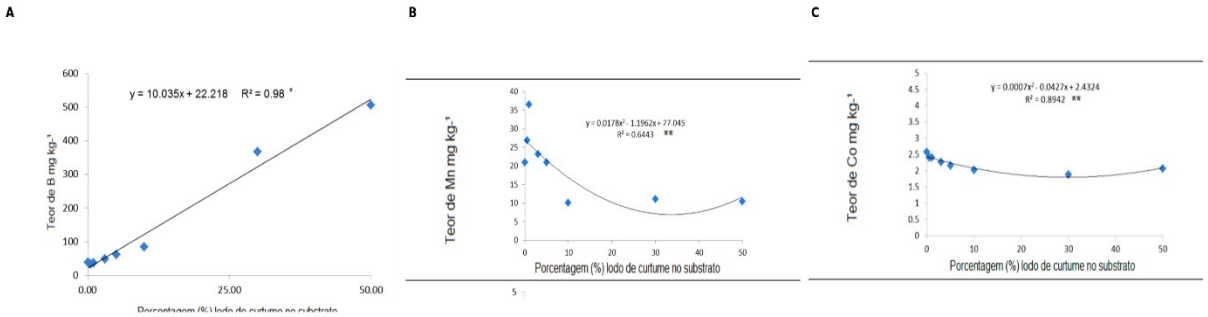
Os dados foram submetidos à análise de variância. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey e, para as variáveis que se ajustaram, foram realizadas análises de regressão. Adotou-se 5% de probabilidade de erro e utilizou-se o Sistema de Análise Estatística (SANEST), descrito por Zonta e Machado (1984).

Resultados

O teor de B aumentou linearmente com a participação do lodo no substrato. A testemunha apresentou aproximadamente 38 mg kg^{-1} na parte aérea, enquanto o tratamento com 50% de lodo atingiu 506 mg kg^{-1}. A concentração de B no substrato também aumentou e passou de 0,50 para 3,00 mg dm^{-3} entre esses tratamentos.

O Mn apresentou resposta quadrática. As mudas cultivadas sem o resíduo apresentaram aproximadamente 21 mg kg^{-1}, enquanto aquelas cultivadas com 50% apresentaram 10,5 mg kg^{-1}. O teor de Mn no substrato diminuiu de 15,9 para 8,6 mg dm^{-3} entre a testemunha e a maior proporção de lodo. O Co também apresentou resposta quadrática, porém com variação de pequena amplitude, e manteve-se próximo ao nível observado na testemunha (Figura 1).

Figura 1 - Teores observados e regressões ajustadas de boro (A), manganês (B) e cobalto (C) na parte aérea de mudas de limoeiro 'Cravo' em função da proporção de lodo de curtume no substrato, aos 45 dias após o transplantio.



Fonte: elaborado pelos autores

Nas maiores proporções de lodo, o teor de B superou a faixa de 30 a 100 mg kg^{-1} utilizada como referência para tecidos de citros. Nessas condições, observaram-se queima das bordas e desenvolvimento de áreas necróticas nas folhas. Os teores de Mn permaneceram abaixo da faixa de 35 a 50 mg kg^{-1} indicada para citros em todos os tratamentos.

Discussão

O aumento acentuado do B constitui o principal desequilíbrio nutricional observado. O incremento no substrato acompanha seu acúmulo na parte aérea e demonstra elevada disponibilidade do elemento para absorção pelo limoeiro 'Cravo'. A ocorrência de queima marginal e áreas necróticas concorda com sintomas associados ao excesso de B em citros (Malavolta; Violante Netto, 1989; Guo *et al.,* 2014). Em plantas cítricas submetidas à toxicidade por B, Guo *et al.* (2014) observaram aumento da concentração do elemento nas folhas e ocorrência de queima foliar, com sintomas cloróticos e necróticos, além de alterações no crescimento. Esses resultados corroboram a associação entre o aumento da disponibilidade de B no substrato, seu acúmulo nos tecidos e a manifestação de sintomas de toxicidade observada no presente estudo.

A resposta linear indica que mesmo pequenas elevações na proporção do resíduo aumentam o teor de B nos tecidos. Portanto, a definição de uma proporção de lodo não pode considerar apenas a ausência de redução no crescimento. A composição mineral fornece indicação mais sensível de desequilíbrio durante a fase inicial de formação das mudas. Esse aspecto é relevante no uso de lodo de curtume, cuja composição apresenta nutrientes minerais e matéria orgânica e pode alterar as características químicas do substrato (Berilli *et al.,* 2014). Dessa forma, o incremento contínuo do B observado nas mudas indica que a elevação de sua disponibilidade deve ser considerada na definição da proporção de lodo, mesmo quando não acompanhada por redução imediata das características de crescimento.

O Mn apresenta comportamento oposto ao B. A redução no substrato e na parte aérea coincide com o aumento do pH de 6,0 para 7,3 promovido pelo lodo. Em condições de maior pH, a disponibilidade de Mn diminui, o que contribui para explicar os menores teores nos tecidos. A disponibilidade de Mn é fortemente condicionada pelas características químicas do meio, especialmente pelo pH, sendo favorecida em condições mais ácidas e reduzida com sua elevação, devido às alterações na solubilidade e no estado de oxidação do elemento (Alejandro *et al.,* 2020). Dessa forma, o aumento do pH promovido pelo lodo constitui uma explicação consistente para a redução do Mn observada neste estudo. Konrad e Castilhos (2002) também verificaram aumento do pH após a aplicação de lodos de curtume, demonstrando a capacidade desses resíduos de modificar as características químicas do solo.

Como as concentrações permanecem abaixo da faixa de referência em todos os tratamentos, o resíduo não corrige a baixa disponibilidade inicial e intensifica a redução nas maiores proporções. Esse comportamento é coerente com a menor disponibilidade de Mn em condições de pH mais elevado (Alejandro *et al.,* 2020). Assim, embora o lodo possa fornecer diferentes elementos ao substrato, sua

aplicação em maiores proporções não resultou em aumento da disponibilidade de Mn, possivelmente em razão das alterações químicas promovidas no meio. Resultados com lodo de curtume também demonstram que a resposta dos micronutrientes não ocorre de maneira uniforme após a aplicação do resíduo (Borges *et al.,* 2007).

O Co varia em menor magnitude. A curva quadrática indica redução discreta até proporções intermediárias e posterior recuperação, mantendo os valores próximos ao observado na testemunha. Assim, embora o elemento responda às alterações do substrato, sua variação é menos acentuada que a observada para B e Mn. A dinâmica do Co no sistema solo-planta é complexa e sua resposta depende das condições do meio e da concentração disponível, sendo considerado um elemento potencialmente benéfico às plantas, embora sua essencialidade para as plantas superiores ainda seja discutida (Hu *et al.,* 2021). Dessa forma, a variação observada no presente estudo não permite atribuir ao pH, isoladamente, a resposta do Co.

A interpretação conjunta demonstra que um mesmo resíduo pode elevar um elemento e reduzir outros. Assim, o lodo não atua apenas como fonte mineral, ele reorganiza as condições químicas do substrato. No presente estudo, o aumento do B, a redução do Mn e a menor amplitude de variação do Co evidenciam respostas distintas à aplicação do resíduo. Esse comportamento é consistente com estudos que demonstram alterações nos teores de micronutrientes de plantas submetidas à aplicação de lodo de curtume, sem resposta uniforme entre os elementos avaliados (Borges *et al.,* 2007). A recomendação de uso exige, portanto, caracterização prévia do resíduo, análise do substrato e monitoramento do estado nutricional das mudas.

Conclusão

O aumento da proporção de lodo de curtume no substrato modifica os teores de B, Mn e Co na parte aérea de mudas de limoeiro ‘Cravo’. O B aumenta acentuadamente e alcança valores associados a sintomas visuais de excesso nas maiores proporções. O Mn diminui, enquanto o Co apresenta variação de pequena magnitude, com valores próximos aos da testemunha. A avaliação do lodo como componente de substrato deve considerar o equilíbrio entre esses elementos e não apenas o crescimento das mudas.

Referências

ALEJANDRO, S.; HÖLLER, S.; MEIER, B.; PEITER, E. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, art. 300, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.00300.

BERILLI, S. S. *et al.* Utilização de lodo de curtume como substrato alternativo para produção de mudas de café conilon. **Coffee Science**, v. 9, n. 4, p. 472-479, 2014.

BORGES, J. D. *et al.* Teores de micronutrientes nas folhas de milho fertilizadas com lodo de curtume. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 2, p. 1-6, 2007.

DIETRICH, O. H. S.; SANTOS, M. A. C.; FERREIRA, V. R.; BERILLI, S. S.; BERILLI, A. P. C. G. Lodo de curtume em substrato comercial para produção de mudas de mamão cv. Golden THB. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 35, n. 4, p. 593-604, 2020. DOI: 10.17224/EnergAgric.2020v35n4p593-604.

GUO, P.; QI, Y.-P.; YANG, L.-T.; YE, X.; JIANG, H.-X.; HUANG, J.-H.; CHEN, L.-S. cDNA-AFLP analysis reveals the adaptive responses of citrus to long-term boron-toxicity. **BMC Plant Biology**, v. 14, art. 284, 2014. DOI: 10.1186/s12870-014-0284-5.

HU, X.; WEI, X.; LING, J.; CHEN, J. Cobalt: an essential micronutrient for plant growth? **Frontiers in Plant Science**, v. 12, art. 768523, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.768523.

KONRAD, E. E.; CASTILHOS, D. D. Alterações químicas do solo e crescimento do milho decorrentes da adição de lodos de curtume. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 257-265, 2002.

LUO, Z.; ZHANG, L.; HU, W.; WANG, Y.; TAO, J.; JIA, Y.; MIAO, R.; CHEN, L.-S.; GUO, J. Excessive boron fertilization-induced toxicity is related to boron transport in field-grown pomelo trees. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, art. 1438664, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1438664.

MALAVOLTA, E.; VIOLANTE NETTO, A. **Nutrição mineral, calagem, gessagem e adubação dos citros**. Piracicaba: Potafos, 1989. 153 p.

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

YANG, W.; YANG, H.; LING, L.; CHUN, C.; PENG, L. Tolerance and physiological responses of citrus rootstock cultivars to boron toxicity. **Horticulturae**, v. 9, n. 1, art. 44, 2023.

ZONTA, E. P.; MACHADO, A. A. **Sistema de Análise Estatística para Microcomputadores**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 1984.

Agradecimentos

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, ao Instituto Federal do Espírito Santo, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à empresa Capixaba Couros Ltda., pelo apoio à realização da pesquisa.