



Scientific Electronic Archives

Issue ID: Vol.18, November/December 2025, p. 1-5

DOI: <http://dx.doi.org/10.36560/18620252127>

+ Corresponding author: guilhermewancura@gmail.com

Inoculação com fungos micorrízicos arbusculares na tolerância de plantas ao cádmio: uma revisão sistemática

Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi in plant tolerance to cadmium: a systematic review

Guilherme Cabral Wancura +, Paola Mendes Milanesi, Denise Cargnelutti

Universidade Federal da Fronteira Sul campus Erechim

Resumo. A contaminação do solo por cádmio (Cd) representa uma ameaça significativa à saúde ambiental e vegetal. Nesse contexto, os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) têm sido estudados como uma alternativa ecológica para mitigar os efeitos tóxicos do Cd em plantas. Teve-se como objetivo, com o presente estudo, revisar sistematicamente a literatura científica dos últimos cinco anos, a fim de se verificar os relatos sobre os efeitos da inoculação com FMAs na tolerância de plantas ao Cd. Foram realizadas buscas nas bases *Web of Science* e *Scopus*, seguidas de análise bibliométrica por meio do *software* R Studio e pacote Bibliometrix e triagem de estudos elegíveis. Ao final, dos 51 artigos gerados pelo programa, 16 atenderam aos critérios de inclusão. Os resultados indicaram que a inoculação com FMAs promove benefícios fisiológicos e morfológicos às plantas, como aumento da biomassa, eficiência fotossintética, atividade antioxidante e redução da translocação de Cd. Além disso, a combinação com biochar, húmus e fertilizantes potencializa os efeitos benéficos. No entanto, a predominância de estudos em condições controladas limita a extrapolação dos resultados para ambientes reais, reforçando a necessidade de mais pesquisas em campo. A presente revisão sistemática contribui para consolidar o conhecimento atual sobre a temática e propõe subsídios para futuras investigações no contexto da agricultura regenerativa, levando em consideração o papel dos FMAs na recuperação da qualidade do solo, redução da toxicidade do Cd e promoção de sistemas agrícolas mais resilientes.

Palavras-chave Endomicorrizas, Toxicidade, Metais pesados, Estresse oxidativo, Agricultura regenerativa

Abstract. Common soil contamination by cadmium (Cd) poses a significant threat to environmental and plant health. In this context, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) have been studied as an ecological alternative to mitigate the toxic effects of Cd in plants. The objective of the present study was to systematically review the scientific literature of the past five years in order to assess the reported effects of AMF inoculation on plant tolerance to Cd. Searches were conducted in the *Web of Science* and *Scopus* databases, followed by bibliometric analysis using RStudio software and the Bibliometrix package, as well as screening of eligible studies. In the end, of the 51 articles generated by the program, 16 met the inclusion criteria. The results indicated that AMF inoculation promotes physiological and morphological benefits to plants, such as increased biomass, photosynthetic efficiency, antioxidant activity, and reduced Cd translocation. Furthermore, the combination with biochar, humus, and fertilizers enhances these beneficial effects. However, the predominance of studies under controlled conditions limits the extrapolation of the results to real environments, highlighting the need for more field research. This systematic review contributes to consolidating current knowledge on the subject and provides insights for future investigations in the context of regenerative agriculture, considering the role of AMF in soil quality restoration, reduction of Cd toxicity, and the promotion of more resilient agricultural systems.

Keywords: Endomycorrhizae, Toxicity, Heavy metals, Oxidative stress, Regenerative agriculture

Introdução

O cádmio (Cd) é um metal pesado (HM) altamente tóxico para os organismos vivos e com alto potencial de dispersão, sendo sua poluição uma preocupação ambiental primária em âmbito

global devido à sua persistência e efeitos nocivos (Li et al., 2023a). Dentre as fontes de emissão de Cd no ambiente, as principais envolvem atividades antropogênicas, tais como mineração, despejo de efluentes industriais, lodo de esgoto e aplicação de

fertilizantes e pesticidas (Pan *et al.*, 2023). Quando presente no solo, o Cd é facilmente absorvido pelas plantas, incluindo as plantas cultivadas, o que representa um risco à saúde humana. Nesse contexto, de acordo com a Agência de Registro de Substâncias Tóxicas e Doenças, o nível médio global de poluição por Cd nos solos agrícolas é de 0,01-2 mg/kg, sendo que a taxa de poluição em algumas áreas excede esse nível (Wang *et al.*, 2023).

Sobre esse viés, em relação às plantas, a presença de quantidades excessivas de Cd no solo (≥ 1 mM) é prejudicial às espécies vegetais, com consequências danosas em aspectos fisiológicos, morfológicos, bioquímicos e moleculares, incluindo inibição da germinação, do alongamento das raízes e do crescimento apical, redução do número de folhas, escurecimento da raiz, degradação da clorofila e clorose (El Rasafiet *al.*, 2022). Também, a intoxicação por Cd ativa a superprodução de espécies reativas de oxigênio que induzem aberrações cromossômicas, mutações genéticas e danos ao DNA que afetam o ciclo e a divisão celular (Hassan *et al.*, 2020).

Nesta perspectiva, os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) surgiram como uma solução viável para a problemática da contaminação do solo por Cd. Por meio de sua associação simbiótica com raízes de plantas, esses fungos desempenham um papel crucial na interação solo-planta, facilitando a expansão das raízes e otimizando a comunidade microbiana da rizosfera da planta hospedeira, aumentando assim a tolerância da planta a estresses ambientais, incluindo aqueles causados por metais pesados (Feng *et al.*, 2024). Em suma, os FMAs são frequentemente considerados ferramentas potenciais, de baixo custo e ecologicamente corretas para amenizar o estresse de HMs em plantas (Li *et al.*, 2023b).

A revisão sistemática consiste em uma investigação científica com métodos sistemáticos pré-definidos a fim de identificar todos os documentos relevantes publicados para uma pergunta de pesquisa, além de avaliar a qualidade desses artigos, extrair os dados e sintetizar os resultados (Donato; Donato, 2019). No contexto da relação entre Cde FMAs, é notável a existência de diversos estudos avaliando a interação entre FMAs e Cd em diferentes espécies vegetais, porém, os resultados estão dispersos e muitas vezes focados em contextos experimentais específicos. Nesse sentido, a realização de uma revisão sistemática da literatura se mostra relevante para consolidar o conhecimento disponível, identificar padrões e lacunas nos estudos existentes e, oferecer subsídios para o avanço científico e tecnológico na área (Page *et al.*, 2021).

Diante disso, teve-se como objetivo com o presente trabalho sintetizar, de forma sistemática, os principais achados científicos sobre os efeitos da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares na

tolerância de plantas ao estresse por Cd, destacando os mecanismos envolvidos e os potenciais benefícios dessa interação para a sanidade vegetal e a sustentabilidade dos agroecossistemas.

Metodologia

A busca bibliográfica foi conduzida nas bases de dados científicas internacionais *Web of Science* e *Scopus*, ambas acessadas por meio do portal Periódicos CAPES, utilizando o sistema de autenticação CAFe. A estratégia de busca foi composta pelas palavras-chave “*arbuscular mycorrhizal fungi*” e “*cadmium*”, combinadas pelo operador booleano “AND”. Também, foi aplicado um filtro de intervalo de data “últimos 5 anos” a fim de se obter estudos mais atuais.

Após esta etapa, os documentos foram exportados no formato BibTeX, respeitando os limites máximos de exportação para cada base (500 registros para *Web of Science* e 2000 registros para *Scopus*). Os arquivos finais da exportação denominados “savedrecs.bib” (*Web of Science*) e “scopus.bib” (*Scopus*) foram encaminhados da área de *download* para uma pasta denominada “bib” criada manualmente no Disco Local (C: \). A análise bibliométrica e integração das bases foram realizadas no *software*RStudio (versão 2025.05.1+513) utilizando o pacote Bibliometrix e sua interface Biblioshiny. Os arquivos “bib” foram lidos, unificados e convertidos em planilha CSV para posterior triagem e extração de dados (Fig. 1).

Em seguida, após a unificação dos documentos extraídos das bases de dados, foi realizado um processo de triagem com base em critérios previamente definidos, a fim de garantir a consistência e a relevância dos estudos selecionados para a revisão. A triagem dos artigos foi conduzida em três etapas sequenciais: leitura dos títulos: para identificar estudos potencialmente compatíveis com os critérios de inclusão; leitura dos resumos: para avaliar a presença da relação experimental entre FMAs e Cd; e leitura integral: para confirmação dos critérios metodológicos, mensuração das variáveis de interesse e validação do conteúdo. Dessa forma, foram considerados elegíveis os artigos que atenderam aos seguintes critérios de inclusão: artigos originais com dados experimentais, abordagem da inoculação de plantas com fungos micorrízicos arbusculares sob estresse por Cde disponibilidade integral do texto (*open access* ou via portal Periódicos CAPES). Ademais, foram excluídos artigos de revisão, trabalhos que envolveram outros metais pesados além do Cd, artigos que mencionaram os FMAs e o Cd, mas não avaliaram diretamente sua interação experimental e estudos com plantas aquáticas ou sem solo/substrato por não refletirem a simbiose com FMAs de forma representativa.



Figura 1. Fluxograma das etapas metodológicas da revisão sistemática.

Fonte: Autores, 2025.

Resultados e Discussão

A busca inicial nas bases de dados resultou em um total de 616 artigos científicos, sendo 276 da *Web of Science* e 340 da *Scopus*. Após a exportação em formato BibTeX e o processamento no *software* RStudio com o pacote Bibliometrix, foi gerado um banco consolidado contendo 51 registros únicos, já com a remoção automática de duplicatas e registros incompatíveis.

Esses 51 artigos foram submetidos à triagem com base nos critérios de elegibilidade previamente definidos. Como resultado, 16 estudos atenderam aos critérios e foram incluídos na presente revisão sistemática. Os artigos selecionados foram organizados na Tabela 1, que contém informações sobre a espécie vegetal avaliada, o tipo de fungo micorrízico arbuscular utilizado, o delineamento experimental, os principais resultados obtidos e a respectiva referência.

Dos 16 artigos incluídos na revisão sistemática, observa-se uma predominância de experimentos conduzidos em ambiente controlado, principalmente em vasos, utilizando diferentes espécies vegetais sob estresse por Cd. Embora esses delineamentos sejam de suma importância para isolar variáveis e compreender mecanismos morfológicos, bioquímicos e fisiológicos, estes não refletem integralmente as interações ocorridas em agroecossistemas reais. No campo, fatores como variação do clima, presença de microrganismos nativos, competição entre espécies vegetais e propriedades físico-química heterogênicas do solo podem influenciar na interação entre as plantas e os FMAs. Estes aspectos acabam reforçando a necessidade de transição para estudos em condições realistas de campo, especialmente em solos agrícolas degradados ou contaminados, cujo desafio não é somente mitigar a toxicidade do Cd, mas também recuperar a funcionalidade dos sistemas produtivos.

Entre as plantas mais investigadas, destaca-se o *Zea mays* L. (milho), presente em quatro estudos (Chen *et al.*, 2023; Kuang *et al.*, 2025; Yu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2020), seguido por *Oryza sativa* (arroz), com três estudos (Li *et al.*, 2020; Vallejos-Torres *et al.*, 2023; Zhao; Wang; Yang, 2024). Essa preferência pode estar relacionada à importância socioeconômica dessas espécies e à sua reconhecida responsividade à inoculação micorrízica. Além disso, essas espécies, pertencentes à família Poaceae, destacam-se pela elevada produção de biomassa e pelo rápido crescimento. Somado a isso, *Zea mays* apresenta metabolismo C4. Tais fatores justificam a escolha dessas espécies, uma vez que são capazes de acumular Cd em função da alta produção de biomassa e do efeito de diluição do metal, sem que este provoque danos às plantas.

Em relação aos FMAs, o gênero mais frequente foi *Funneliformis*, especialmente *F. mosseae*, utilizado em aproximadamente metade dos estudos (Hu *et al.*, 2024; Jia *et al.*, 2023; Kuang *et al.*, 2025). Outros FMAs recorrentes foram *Rhizophagus intraradices* (Liu *et al.*, 2024) e membros dos gêneros *Glomus* (Zhao; Chen; Xiao, 2021), *Claroideoglomus*, *Microkamsiensia* (Vallejos-Torres *et al.*, 2023) e *Diversispora* (Sun *et al.*, 2023). Com relação a recorrência de *F. mosseae*, embora demonstre a eficácia deste microrganismo simbiote, isso acaba por limitar a generalização dos resultados, uma vez que não abrange a diversidade micorrízica arbuscular existente nos diferentes solos agrícolas, incluindo regiões tropicais. Dessa forma, é importante que futuros estudos ampliem a gama de espécies testadas, levando em consideração FMAs nativos adaptados às condições edafoclimáticas regionais, podendo contribuir para o avanço científico e para práticas viáveis em programas de manejo sustentável do solo.

Tabela 1. Revisão de estudos sobre efeitos da inoculação com FMAs na tolerância de plantas ao cádmio.

Planta	Espécie de FMA	Metodologia	Principais resultados	Referência
<i>Zea mays</i> L.	<i>Funneliformis mosseae</i>	Experimentos Rhizobox foram conduzidos com e sem inoculação de MA, juntamente com o tratamento com Cd.	A simbiose com MA atenuou a toxicidade de Cd no milho por meio de múltiplos mecanismos, incluindo aumento da fotossíntese, absorção de nutrientes, defesas antioxidantes e modulação do transporte e acúmulo de Cd.	Kuang <i>et al.</i> (2025)
<i>Oryza sativa</i> L.	<i>Funneliformis mosseae</i>	Os experimentos foram conduzidos em vasos utilizando FMAs e biochar.	A aplicação combinada de biochar e FMA levou a um aumento notável da biomassa da raiz do arroz em 42,2%. Também, o biochar mitigou as limitações estomáticas impostas pelo Cd no processo fotossintético.	Zhao; Wang; Yang (2024)
<i>Cinnamomum camphora</i> L.	<i>Rhizophagus intraradices</i> e <i>Diversispora versiformis</i>	A inoculação micorrízica junto com biochar de casca de arroz foi realizada em solos enriquecidos com Cd (0, 15, 150 mg Cd por kg de solo).	A inoculação de FMA sozinha melhorou a biomassa da planta, a taxa fotossintética líquida, a absorção de fósforo (P), bem como atenuou o acúmulo de Cd nos brotos das plantas.	Jin <i>et al.</i> (2024)
<i>Triticum aestivum</i> L.	<i>Rhizophagus intraradices</i>	O experimento feito em vaso realizou a co-aplicação de FMA e fertilizante contendo Selênio (Se) em trigo sob estresse de Cd.	A inoculação de FMA sozinha ou combinada com fertilizante contendo Se aumentou significativamente a biomassa do trigo, reduziu a concentração de Cd disponível e otimizou a rede bacteriana da rizosfera.	Liu <i>et al.</i> (2024)
<i>Festuca elatensis</i> Keng ex <i>Elymus</i> v	<i>Funneliformis mosseae</i>	A inoculação com FMA foi realizada em substrato de cultivo conduzido em estufa.	Os FMAs promoveram o crescimento da planta em comparação com o grupo sem inoculação. Os conteúdos de Cd na parede celular do broto e da raiz aumentaram em 20,63% e 16,66%, respectivamente. Além disso, os FMAs aumentaram a abundância relativa de bactérias benéficas da rizosfera.	Hu <i>et al.</i> (2024)
<i>Lolium perenne</i> L. e <i>Amorpha fruticosa</i> L.	<i>Diversisporae burnea</i>	O experimento foi realizado em vaso em dois grupos (com ou sem inoculante) e três níveis de concentração de Cd (0, 5 e 15 mg/kg).	<i>L. perenne</i> exibiu maior produtividade e maior absorção de Cd do que <i>A. fruticosa</i> , com ou sem inoculação. No entanto, <i>D. burnea</i> alterou a especiação de Cd do solo aumentando a proporção de Cd trocável e diminuindo o Cd residual.	Sun <i>et al.</i> (2023)
<i>Oryza sativa</i> L.	<i>Claroideoglomus</i> sp., <i>Microkamienskia peruviana</i> , <i>Microkamienskia</i> sp., <i>Diversispora</i> sp. e <i>Claroideoglomus etunicatum</i>	O experimento foi realizado em vasos e combinou inóculo de FMAs com esterco de aves compostado humificado.	A maior altura da planta (57,77 cm), comprimento da raiz (31,67 cm) e peso da raiz (167 g), peso da parte aérea (74,67 g) e teor de clorofila (34,30 unidades SPAD) foram obtidos no tratamento FMA-composto.	Vallejos- Torres <i>et al.</i> (2023)
<i>Zea mays</i> L.	<i>Funneliformis mosseae</i>	O experimento foi realizado em vaso com solo poluído por Cd (17,1 mg/kg Cd) com duas variedades de milho, Panyu 3 e Ludan 8.	O FMA incrementou o crescimento, os níveis de nutrientes minerais e a morfologia da raiz e promoveu aumentos nas concentrações de lignina e fitohormônios nas raízes, bem como a absorção de Cd nas duas variedades de milho.	Chen <i>et al.</i> (2023)
<i>Eucalyptus grandis</i> W.Hill	<i>Rhizophagus irregularis</i>	O experimento foi realizado em vasos com tratamentos de 50, 150, 300 e 500 µM de Cd.	A colonização pelo FMA aumentou o crescimento da planta e a eficiência fotossintética e reduziu o fator de translocação de Cd em 56,41%, 62,89%, 66,67% e 42,79% para cada concentração de Cd respectivamente.	Kuang <i>et al.</i> (2023)

<i>Leymuschinese</i> (Trin.) Tzvelev, <i>Puccinellia distans</i> (Jacq.) Parl. e <i>Astragalus adsurgens</i> Pall.	<i>Funneliformis mosseae</i>	O experimento foi conduzido em vasos em estufa com solo salino contaminado por cádmio.	O FMA aumentou a biomassa de <i>A. adsurgens</i> , mas não a de <i>L. chinensis</i> e <i>P. distans</i> . Também, o FMA promoveu a absorção de fósforo (P) do solo e melhorou a proporção K ⁺ : Na ⁺ da parte aérea, mas diminuiu as concentrações de Na ⁺ e Cd da parte aérea e suas taxas de translocação em <i>A. adsurgens</i> .	Jia et al. (2023)
<i>Zea mays</i> L.	<i>Funneliformis mosseae</i>	O experimento foi realizado em um sistema de coluna de areia-milho contendo 20 mg/L de solução de Cd.	O FMA aumentou significativamente a absorção de Cd pelo milho em 68,1% e a perda por lixiviação de Cd em 84,6%. No sistema coluna de areia-milho, 92,3% do Cd total foi adsorvido pela areia, e 5,9% foi absorvido pelo milho.	Yu et al. (2022)
<i>Medicago ruthenica</i> L. e <i>Hordeum vulgare</i> L.	<i>Glomus mosseae</i> e <i>Glomus mossetunicatum</i>	Em um experimento a campo combinou-se nano húmus (150 g/m ² em solos), FMAs (250 g inóculo/m ² em solos) e fertilizante (37 g/m ² em solos).	A combinação de FMAs e nano húmus mostrou maior impacto na biomassa de raízes e brotos de alfafa, que aumentou 18 e 12 vezes, respectivamente. A cevada respondeu mais positivamente às combinações de FMAs, nano húmus e fertilizante, no qual a biomassa de raízes aumentou 4 vezes, a biomassa de brotos e a produção de sementes aumentaram 3 vezes.	Zhao; Naeth (2022)
<i>Medicago sativa</i> L.	<i>Glomus mosseae</i>	O experimento foi conduzido em vasos utilizando somente FMAs.	O FMA aumentou a eficiência de eliminação de EROs, amenizou a inibição do Cd no transporte fotossintético de elétrons, aumentou a assimilação de nitrogênio e melhorou a biomassa foliar e radicular em 43,87% e 59,71% respectivamente.	Wang et al. (2022)
<i>Cichorium intybus</i> L.	<i>Glomus tortuosum</i> , <i>G. mossetunicatum</i> , <i>G. aggregatum</i> e <i>G. versiforme</i>	O experimento foi conduzido em vasos utilizando FMAs, biochar e fertilizantes nitrogenados (N).	Os FMAs inibiram a absorção de Cd pela planta e a adição de biochar acentuou a inibição da concentração de Cd. Também, a aplicação de fertilizante nitrogenado, combinado com os FMAs e biochar, reduziu significativamente a toxicidade de Cd nas plantas.	Zhao; Chen; Xiao (2021)
<i>Zea mays</i> L.	<i>Funneliformis mosseae</i>	O experimento foi conduzido em vaso com solo contaminado por Cd (10, 21 mg/kg Cd), utilizando somente FMAs.	O FMA aumentou a biomassa do milho e a absorção de Cd nos brotos. Além disso, o FMA diminuiu o conteúdo de Cd disponível no solo em 20-24% e reduziu a perda de lixiviação de Cd no solo em 19,9%.	Zhang et al. (2020)
<i>Oryza sativa</i> L.	<i>Funneliformis mosseae</i> e <i>Rhizophagus intraradices</i>	Os FMAs foram inoculados em arroz exposto a 0,2 e 10 mg/kg Cd no solo.	Os níveis de EROs foram mitigados nos tratamentos +FMA + Cd. Também, o conteúdo de clorofila e a ultraestrutura das células do mesófilo foram melhorados pelos FMAs e as concentrações de Cd nas plantas foram significativamente diminuídas.	Li et al. (2020)

Fonte: Autores, 2025.

Ao analisar os resultados dos estudos, os FMAs destacaram-se por denotar efeitos positivos em diversos parâmetros fisiológicos e morfológicos das plantas cultivadas em solo contaminado com Cd. Entre os efeitos mais recorrentes estão a melhora na biomassa vegetal, incluindo aumento de parte aérea e raízes em espécies como *Triticum aestivum* (Liu et al., 2024), *Medicago sativa* (Wang et al., 2022) e *Zea mays* (Zhang et al., 2020). Também foram relatados aumentos na taxa fotossintética e no conteúdo de clorofila, indicando atenuação do estresse causado pelo Cd sobre a fotossíntese, como em *Cinnamomum camphora* (Jin et al., 2024) e *Eucalyptus grandis* (Kuang et al., 2023).

Além disso, muitos estudos evidenciaram a redução da translocação do metal para as partes aéreas das plantas, com reduções superiores a 50% no fator de translocação em espécies como *E. grandis* (Kuang et al., 2023). Esse resultado implica fortemente para a segurança alimentar, uma vez que culturas de interesse humano, como arroz e milho, podem acumular Cd nos grãos, o que representa um risco à saúde pública pela possibilidade de entrada do metal pesado na cadeia alimentar. A diminuição da mobilidade do Cd em plantas micorrizadas não apenas melhora os desempenhos fisiológicos e bioquímicos, mas também pode reduzir a exposição humana ao metal em áreas agrícolas contaminadas. Este aspecto acaba evidenciando que os FMAs podem não apenas atuarem como mitigadores de estresse vegetal, mas também como ferramenta estratégica de biossegurança para a produção agrícola sustentável.

Outro efeito observado foi a ativação de mecanismos antioxidantes, com diminuição de espécies reativas de oxigênio (EROs) e aumento da atividade de enzimas antioxidantes, como catalase e superóxido dismutase (Li et al., 2020; Wang et al., 2022). Também, em alguns estudos, os FMAs atuaram de forma indireta ao melhorar a estrutura do solo, modificando a microbiota rizosférica e alterando a especiação do Cd, reduzindo sua disponibilidade (Liu et al., 2024; Hu et al., 2024).

Além disso, alguns estudos avaliaram os efeitos da inoculação de FMAs combinada com outras estratégias, como aplicação de biochar, húmus e fertilizantes. Tais abordagens sinérgicas indicaram efeitos ainda mais pronunciados na mitigação da toxicidade do Cd. Em *O. sativa* (Zhao; Wang; Yang, 2024) e *C. camphora* (Jin et al., 2024), por exemplo, a combinação de biochar com FMAs aumentou a biomassa e reduziu os níveis de Cd nos tecidos vegetais. Resultados semelhantes foram obtidos na aplicação de húmus enriquecido e FMAs em culturas como *Medicago ruthenica* L. e *Hordeum vulgare* L., sob condições de campo com forte incremento na biomassa total (Zhao; Naeth, 2022). A adição simultânea de FMAs, biochar e fertilizante nitrogenado em *Cichorium intybus* também promoveram acentuada redução na

absorção de Cd e melhoria das condições fisiológicas da planta (Zhao; Chen; Xiao, 2021). Esses resultados sugerem uma alta sinergia entre a micorrização e o uso de insumos orgânicos ou minerais, potencializando tanto a redução da translocação do Cd quanto a melhoria das condições fisiológicas e bioquímicas das plantas. No entanto, ainda é necessário avaliar a viabilidade econômica e logística dessas práticas em larga escala, especialmente para pequenos e médios agricultores. A integração de FMAs com biochar, húmus ou fertilizantes pode representar uma estratégia com alto potencial para a agricultura regenerativa, otimizando a recuperação da qualidade do solo e reduzindo o uso de insumos químicos convencionais. Dessa forma, a aplicação de FMAs não se limita a práticas laboratoriais e passa a ganhar relevância em sistemas de produção mais sustentáveis.

Apesar dos resultados promissores, a presente revisão destacou algumas limitações recorrentes nos estudos analisados. A maioria foi conduzida em condições de casa de vegetação e em vasos, sendo raros os estudos à campo (Zhao; Naeth, 2022). Além disso, houve grande variação nos métodos experimentais utilizados, como espécies vegetais, concentração de Cd, tempo de exposição e tipos de FMAs, o que dificulta comparações diretas e limita o potencial para metanálises. Também, outro ponto que foi mencionado na literatura é a viabilidade da produção e aplicação de inoculantes micorrízicos arbusculares em escala comercial, além da transferência dessa tecnologia para demais agricultores. Tais lacunas reforçam a necessidade de um maior investimento em pesquisas aplicadas que unam rigor científico e a implementação prática em campo, possibilitando que o uso de FMAs deixe de ser apenas uma estratégia experimental e passe a integrar programas de recuperação em áreas agrícolas contaminadas.

Conclusão

A presente revisão sistemática evidencia que a inoculação com FMAs apresenta potencial para mitigar os efeitos tóxicos do cádmio em diferentes espécies vegetais cultivadas em solos contaminados. Os estudos analisados demonstram efeitos positivos recorrentes sobre a biomassa vegetal, eficiência fotossintética, atividade antioxidante e redução da translocação de Cd para as partes aéreas das plantas. O uso combinado de FMAs com biochar, húmus ou fertilizantes amplia os efeitos benéficos da micorrização, tornando as plantas mais resilientes frente a condições ambientais adversas. Assim, futuros trabalhos devem priorizar experimentos a campo, com diferentes consórcios de FMAs e espécies vegetais adaptadas às condições regionais, a fim de ampliar a aplicabilidade dos resultados. Dessa forma, destaca-se o papel dos FMAs não somente como mitigadores da toxicidade do Cd, mas também

como potencial ferramenta capaz de restaurar solos degradados e promover sistemas agrícolas mais resilientes e harmônicos no contexto da agricultura regenerativa.

Agradecimentos

Universidade Federal da Fronteira Sul.

Referências

- CHEN, J. *et al.* An arbuscular mycorrhizal fungus differentially regulates root traits and cadmium uptake in two maize varieties. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 264, p. 115458, 2023.
- DONATO, H.; DONATO, M. Stages for undertaking a systematic review. *Acta Médica Portuguesa*, v. 32, n. 3, p. 227-235, 2019.
- EL RASAFI, T. *et al.* Cadmium stress in plants: A critical review of the effects, mechanisms, and tolerance strategies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 52, n. 5, p. 675–726, 2022.
- FENG, Z. *et al.* Metabolomics analysis of bahia grass (*Paspalum notatum*) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi exposed to soil Cd stress. *Environmental and Experimental Botany*, v. 226, p. 105867, 2024.
- HASSAN, M. J. *et al.* Effect of Cadmium Toxicity on Growth, Oxidative Damage, Antioxidant Defense System and Cadmium Accumulation in Two Sorghum Cultivars. *Plants*, v. 9, n. 11, p. 1575, 2020.
- HU, X. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi alter microbiome structure of rhizosphere soil to enhance *Festuca elata* tolerance to Cd. *Applied Soil Ecology*, v. 204, p. 105735, 2024.
- JIA, B. *et al.* Differential effects of arbuscular mycorrhizal fungi on three salt-tolerant grasses under cadmium and salt stress. *Land Degradation & Development*, v. 34, n. 2, p. 506–520, 2023.
- JIN, X. *et al.* The combined application of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improves the Cd tolerance of *Cinnamomum camphora* seedlings. *Rhizosphere*, v. 31, p. 100939, 2024.
- KUANG, Q. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate cadmium stress in maize. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 289, p. 117600, 2025.
- KUANG, Y. *et al.* Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Root Cell Ultrastructure of *Eucalyptus grandis* under Cadmium Stress. *Journal of Fungi*, v. 9, n. 2, p. 140, 2023.
- LI, H. *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on redox homeostasis of rice under Cd stress. *Plant and Soil*, v. 455, p. 121-138, 2020.
- LI, H. *et al.* Physiological and proteomic analyses reveal the important role of arbuscular mycorrhizal fungi on enhancing photosynthesis in wheat under cadmium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 261, p. 115105, 2023a.
- LI, W. *et al.* Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Alleviating Cadmium Stress in *Medicago truncatula* Gaertn. *Plants*, v. 12, n. 3, p. 547, 2023b.
- LIU, H. *et al.* Combined application of arbuscular mycorrhizal fungi and selenium fertilizer increased wheat biomass under cadmium stress and shapes rhizosphere soil microbial communities. *BMC Plant Biology*, v. 24, n. 1, p. 359, 2024.
- PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, 2021.
- PAN, J. *et al.* Comprehensive analysis reveals the underlying mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi in kenaf cadmium stress alleviation. *Chemosphere*, v. 314, p. 137566, 2023.
- SUN, J. *et al.* Effect of Arbuscular Mycorrhiza Fungus *Diversisporae burnea* Inoculation on *Lolium perenne* and *Amorpha fruticosa* Growth, Cadmium Uptake, and Soil Cadmium Speciation in Cadmium-Contaminated Soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 1, p. 795, 2023.
- VALLEJOS-TORRES, G. *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, poultry manure compost, and cadmium on plant growth and nutrient absorption of *Oryza sativa*. *Chilean journal of agricultural research*, v. 83, n. 6, p. 656–665, 2023.
- WANG, H. *et al.* Rhizosphere interface microbiome reassembly by arbuscular mycorrhizal fungi weakens cadmium migration dynamics. *iMeta*, v. 2, n. 4, 2023.
- WANG, H. R. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungus regulates cadmium accumulation, migration, transport, and tolerance in *Medicago sativa*. *Journal of Hazardous Materials*, v. 435, p. 129077, 2022.
- ZHANG, J. *et al.* An arbuscular mycorrhizal fungus increased the macroaggregate proportion and reduced cadmium leaching from polluted soil. *International Journal of Phytoremediation*, p. 1–9, 2020.
- ZHAO, T.; WANG, L.; YANG, J. Synergistic effects of combined application of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on the safe production of rice in

cadmium contaminated soil. Science of The Total Environment, v. 951, p. 175499, 2024.

ZHAO, Y.; NAETH, M. A. Soil amendment with a humic substance and arbuscular mycorrhizal Fungi enhance coal mine reclamation. Science of The Total Environment, v. 823, p. 153696, 2022.

ZHAO, Z.; CHEN, L.; XIAO, Y. The combined use of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and nitrogen fertilizer is most beneficial to cultivate *Cichorium intybus* L. in Cdcontaminated soil. Ecotoxicologyand Environmental Safety, v. 217, p. 112154, 2021.