

# AVANÇOS E DESAFIOS NA REMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR METAIS PESADOS: REVISÃO DA BIORREMEDIAÇÃO E FITORREMEDIAÇÃO

**FONTES**, Mariana Gizélia<sup>1</sup>; **SILVA**, Daiane Oresta Neves<sup>2</sup>; BITTENCOURT, A.H.C<sup>3</sup>

**Resumo:** A contaminação de solos por metais pesados representa um desafio ambiental significativo devido à persistência desses poluentes e à sua acumulação. Este artigo revisa criticamente os avanços e desafios das técnicas de remediação, com foco na biorremediação e fitorremediação, abordando sua eficácia e potencial para mitigação sustentável e econômica dos impactos ambientais. A pesquisa foi conduzida através de uma revisão narrativa da literatura, abrangendo estudos publicados entre 2015 e 2024 nas bases PubMed, Google Scholar e SciELO. Os resultados apontam que, apesar das promessas dessas técnicas, sua implementação enfrenta desafios práticos, como a variabilidade na eficácia e a necessidade de adaptação às condições locais. Conclui-se que a aplicação eficaz dessas técnicas, aliada a políticas rigorosas e ao aprimoramento das práticas de remediação, é essencial para proteger tanto o meio ambiente quanto a saúde pública.

**Palavras-chave:** Poluição. Metais Pesados. Biorremediação. Fitorremediação. Saúde Pública.

## 1 INTRODUÇÃO

A poluição por metais pesados nos solos constitui uma perturbação altamente complexa no equilíbrio do sistema ecológico (Cardoso, 2020, p. 3). Uma característica importante desses metais é sua capacidade de não degradabilidade, o que os torna altamente persistentes no ambiente e acumulativos na cadeia alimentar (Kirpichtchikova *et al.*, 2006; Fernandes & Silva, 2021, p.1), como consequência podem se tornar tóxicos quando suas concentrações ultrapassam determinados limites (Haber, 2023, p. 18).

Atualmente, a população tem sofrido graves problemas de saúde pública em decorrência da quantidade exorbitante de poluentes que tem sobrecarregado a natureza. Poluentes estes, que são gerados principalmente pelas indústrias e comércios que depositam resíduos tóxicos em corpos hídricos, acarretando a mortandade do ecossistema aquático e, por sua vez, a transmissão de doenças através da cadeia trófica. Como também, a utilização de metais pesados que atingem o solo através da agricultura, infectando os

---

<sup>1</sup> Apresentação do pesquisador. FAMINAS-Muriaé. [marianagfontes00@gmail.com](mailto:marianagfontes00@gmail.com).

<sup>2</sup> Apresentação do pesquisador. FAMINAS-Muriaé. [daianenevessilva104@gmail.com](mailto:daianenevessilva104@gmail.com)

<sup>3</sup>-Professor, Coordenador de Pesquisa FAMINAS MURIAÉ. [alexandre.couto@professor.faminas.edu.br](mailto:alexandre.couto@professor.faminas.edu.br)

alimentos que são dispostos a toda a população. Outro tipo de poluição frequente é a quantidade de resíduos gerados pela própria população e seu local de descarte indevidamente que, muitas vezes, são depositados em lixões ou nos próprios cursos d'água sem passar por algum processo de tratamento (Cavalcanti *et al.*, 2021, p.1)

Quando em contato com o solo, estes metais podem ser dispersados por arraste de sedimentos, lixiviação em águas superficiais, infiltração em águas subterrâneas, dispersão por ventos e acumulando-se na cadeia alimentar. Mas esses poluentes gerados podem ser removidos por métodos físicos, químicos e biológicos de tratamento, minimizando os efeitos na saúde humana e ambientais (Copetti *et al.*, 2022, p. 3). Através de diferentes técnicas de remediação de metais pesados no solo, tais como o revestimento de superfície, encapsulamento, vazamento, lavagem do solo, extração eletro-cinética, estabilização, solidificação, vitrificação, fitorremediação e biorremediação (Fernandes & Silva, 2021, p. 1)

As técnicas de biorremediação e fitorremediação são boas opções para o processo de remediação de solos contaminados por metais pesados. O método de remediação biológica visa biodegradar, biotransformar e/ou remover contaminantes de uma matriz ambiental através da inserção de microrganismos ou plantas com capacidade de metabolizar o contaminante (Moreira *et al.*, 2016; Lacerda *et al.* p, 2). De acordo com Oliveira, *et al* (2007), na fitorremediação as plantas removem os contaminantes de duas formas. Uma dessas maneiras é a forma indireta, na qual o vegetal retira do próprio solo ou de águas subterrâneas os contaminantes, reduzindo assim, a fonte de contaminação. Já na forma direta, as plantas absorvem os compostos tóxicos em seu tecido, acumulando-os e, por fim, metabolizando esses contaminantes (Copetti, *et al.*, 2022, p. 3). Portanto, a implementação eficaz de técnicas como biorremediação e fitorremediação se apresenta como uma solução promissora para mitigar os impactos da poluição por metais pesados, oferecendo um caminho sustentável para a recuperação dos ecossistemas e proteção da saúde pública. Sendo assim, o objetivo desta revisão bibliográfica é avaliar as consequências da poluição por metais pesados no solo e na saúde pública, e explorar as abordagens mais eficazes para sua mitigação, com foco nas técnicas de biorremediação e fitorremediação.

## **2 OBJETIVOS**

Avaliar as consequências da poluição por metais pesados no solo e na saúde pública, e explorar as abordagens mais eficazes para sua mitigação, com foco nas técnicas de biorremediação e fitorremediação.

## **3 METODOLOGIA**

Trata-se de uma revisão de literatura do tipo narrativa, conduzida durante os meses de julho e agosto de 2024, com o objetivo de reunir e avaliar criticamente as informações e dados disponíveis referentes aos avanços e desafios na remediação de solos contaminados por metais pesados, com ênfase nos processos de biorremediação e fitorremediação.

A metodologia seguiu as seguintes etapas: inicialmente, foi realizada a identificação do tema e, em seguida, a elaboração da pergunta norteadora: “Quais são os avanços e desafios existentes na remediação de solos contaminados por metais pesados?” Definiram-se, então, os critérios de inclusão e exclusão.

Os critérios de inclusão abrangeram artigos publicados entre 2015 e 2024, disponíveis em texto completo e de acesso livre, em português ou inglês, que abordassem a contaminação do solo e as técnicas de remediação. Foram excluídos artigos que não apresentassem ao menos uma das palavras-chave utilizadas ou que não tratassem diretamente do tema em questão.

Foram encontrados 50 artigos sobre o impacto de metais pesados no solo. No entanto, após revisar os resumos e as palavras-chave, apenas 12 artigos foram selecionados. A busca dos artigos foi realizada nas bases de dados PubMed, Google Scholar e SciELO, utilizando os descritores: “poluição”, “metais pesados”, “biorremediação”, “fitorremediação”, “contaminação do solo” e “saúde pública”. Os artigos selecionados foram lidos na íntegra e avaliados criticamente, considerando-se a relevância e a qualidade das informações apresentadas. Por fim, os resultados foram interpretados e sintetizados para a elaboração deste artigo, buscando destacar as tendências e os desafios nas tecnologias de remediação de solos contaminados por metais pesados.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A contaminação ambiental por metais pesados resulta em impactos negativos significativos, incluindo a poluição do ar, dos solos e dos ecossistemas aquáticos. Esses contaminantes não apenas afetam gravemente a vida de diversas espécies, como também representam um risco sério à saúde humana, devido ao potencial de causar intoxicações e outras consequências adversas. Nesse sentido, faz-se necessário avaliar os diversos fatores que contribuem para a poluição do meio ambiente, além de destacar os principais metais pesados que causam danos, sendo estes em muitos casos irreversíveis (Barroco *et al.*, 2019, p 10).

Existe uma grande parcela de metais pesados depositados no ambiente que são decorrentes de atividades antrópicas, um exemplo muito notório está na disposição de pilhas no lixo comum, material composto por diversos metais, e frequentemente não tem sua destinação correta. O descarte inadequado desses metais tóxicos transforma o solo em um local de alto risco para a saúde humana, sendo que os graus de mobilidade e a porção disponível variam de acordo com o tipo de solo, pH, temperatura e competição com outros metais (Barroco *et al.*, 2019, p 10).

A utilização de técnicas de remediação é essencial para reduzir as concentrações de contaminantes a níveis seguros para a humanidade, garantindo que não haja dispersão para o ambiente. Nesse contexto, a biorremediação se destaca como uma biotecnologia que utiliza microrganismos para transformar contaminantes em substâncias menos tóxicas. Essa técnica pode ser aplicada tanto *in situ*, quando o material contaminado é tratado no próprio local, quanto *ex situ*, quando o material é removido para tratamento em outro local (Agante, 2021).

Entretanto, apesar dos avanços, essas técnicas enfrentam desafios significativos. Entre as técnicas *in situ* mais utilizadas, destaca-se a biorremediação passiva ou intrínseca, na qual os próprios microrganismos do local, sem o uso de tecnologias ativas e com baixo custo, transformam os contaminantes em substâncias menos tóxicas (Coutinho *et al.*, 2015, p. 59).

Entre as técnicas *ex situ*, destacam-se o Landfarming, uma tecnologia que remove biologicamente resíduos do solo contaminado, usando o oxigênio do ar para estimular bactérias aeróbias a degradar os contaminantes. O solo é

revolvido por aração e gradagem para melhorar a aeração e distribuir os contaminantes, além de receber corretivos e fertilizantes para otimizar o processo. Os biorreatores são equipamentos que facilitam reações químicas usando biocatalisadores, aumentando a disponibilidade dos contaminantes para os microrganismos degradadores e garantindo uma distribuição uniforme no solo. A compostagem é empregada para tratar solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, compostos mutagênicos e cancerígenos. No processo de biopilhas, o solo é removido do local original e empilhado em um ambiente onde se pode controlar a lixiviação e o escoamento dos líquidos gerados (Coutinho *et al.*, 2015, p. 59).

Dentro da biorremediação insere-se ainda a fitorremediação que é uma técnica que utiliza plantas para remover contaminantes através de processos químicos e físicos que ocorrem naturalmente nelas. As principais técnicas de fitorremediação incluem a Fitoextração, onde as plantas retiram contaminantes do solo e os armazenam em seus tecidos; a Fitotransformação, que utiliza o metabolismo das plantas para degradar poluentes na água ou no solo; a Fitoestimulação, que estimula a atividade de microrganismos degradadores na rizosfera das plantas; e a Fitoestabilização, que usa plantas para minimizar a movimentação dos contaminantes no solo. Isso permite selecionar e aplicar a técnica mais adequada, considerando as condições específicas do local e os tipos de contaminantes presentes (Coutinho *et al.*, 2015, p 59).

O conhecimento e as tecnologias disponíveis para o tratamento de resíduos agrícolas têm o potencial de diminuir significativamente os impactos ambientais. No entanto, a adoção dessas práticas ainda será limitada enquanto a ideia de que os ecossistemas fornecem recursos gratuitos e ilimitados persistir, ou enquanto não houver uma fiscalização eficaz para garantir o cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Nascimento *et al.*, 2022).

A fitorremediação se destaca por sua viabilidade econômica, apresentando custos operacionais e de manutenção significativamente mais baixos quando comparada a técnicas como adsorção, processos oxidativos avançados, ozonização e fotocatalise, entre outras. Além disso, a biomassa gerada pelo processo possui um valor econômico considerável devido às suas diversas potencialidades. No entanto, como uma tecnologia em evolução, a fitorremediação ainda enfrenta desafios, incluindo a definição precisa do tempo

necessário para alcançar uma descontaminação eficaz. Condições climáticas e ambientais também desempenham um papel crucial na adaptação das plantas usadas, podendo limitar seu crescimento e eficiência na remediação (Araujo, 2023).

Embora as tecnologias de remediação discutidas apresentem avanços significativos, elas também enfrentam desafios práticos que limitam sua aplicação em larga escala. A eficácia das técnicas de biorremediação e fitorremediação depende de fatores como a natureza do solo, as características dos contaminantes e as condições ambientais, além da viabilidade econômica e logística dos processos. A pesquisa e o desenvolvimento de novas abordagens, aliadas a uma regulamentação mais rigorosa, são cruciais para garantir que essas tecnologias possam ser aplicadas de forma eficaz e sustentável no futuro.

## **5 CONCLUSÃO**

A poluição por metais pesados constitui um desafio ambiental e de saúde pública de grande envergadura, devido à sua persistência no ambiente e ao potencial para causar danos de longo prazo. As atividades antropogênicas, como industrialização, mineração e práticas agrícolas inadequadas, têm intensificado a contaminação do solo e dos ecossistemas aquáticos, acarretando impactos adversos tanto para a biodiversidade quanto para a saúde humana.

A análise de técnicas de remediação, com destaque para a biorremediação e a fitorremediação, evidencia que essas abordagens oferecem soluções promissoras para mitigar os efeitos da poluição por metais pesados. Entretanto, tais técnicas enfrentam desafios significativos, como a variabilidade na eficácia, dependente das condições ambientais, e a necessidade de uma compreensão mais aprofundada e de adaptação das práticas às especificidades locais.

A biorremediação e a fitorremediação demandam contínua inovação para superar limitações práticas e ampliar sua aplicabilidade em larga escala. Apesar dos avanços, a implementação eficaz dessas técnicas, associada a políticas rigorosas de gestão de resíduos, é essencial para mitigar os impactos da contaminação e proteger tanto a saúde pública quanto o meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

AGANTE, A. C. C. **Remediação de Solos Contaminados Por Metais Pesados Por Aplicação de Biochars**. Dissertação de Mestrado. 2021.

AMADO, S.; CHAVES FILHO, J. T. Fitorremediação: uma alternativa sustentável para remediação de solos contaminados por metais pesados. **Natureza Online**, v. 13, n. 4, p. 159–164, 2015. Disponível em: <https://www.naturezaonline.com.br/revista/article/view/172>. Acesso em: 17 ago. 2024.

ARAÚJO, A. H. C de. **Biorremediação de solos salinizados: uma alternativa para o semiárido brasileiro**. Dissertação de Mestrado. 2023.

BARROCO, I. S. *et al.* Impactos ambientais de metais pesados de pilhas na tríade água-ar-solo. **Revista Scientiarum Historia**, v. 1, p. 10-10, 2019.

CARDOSO, L. F. **Remediação de solos contaminados com metais pesados-combinação de nanotecnologias e aditivos naturais**. Dissertação de Mestrado. 2020.

CAVALCANTI, *et al.* Variação da aplicabilidade da fitorremediação e seus benefícios em ambientes contaminados. **Revista Interdisciplinar E Do Meio Ambiente (Rima)**, v. 3, n. 1, p. 10, 2021.

COPETTI, C. M.; *et al.* Biorremediação: metodologia sustentável na remoção de xenobióticos da água. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 9, p. 11, 2022.

COUTINHO, P. W. R. *et al.* Alternativas de remediação e descontaminação de solos: biorremediação e fitorremediação. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 59-68, 2015.

FERNANDES, J. A. F.; SILVA, L. N. A. **Técnicas de biorremediação microbiana de solos contaminados com metais pesados**. XII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Salvador/BA – 08 a 11/11/2021. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, p. 6, 2021.

HABER, E. P. Z.; *et al.* **Respostas fisiológicas, nutricionais, morfoanatômicas de plantas fitoremediadoras em solos contaminados por metais pesados: uma revisão de literatura**. 2023.

LACERDA, E. M. C.; *et al.* Processos enzimáticos na biorremediação de petróleo e fitorremediação em sedimentos de mangue: uma revisão. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, n. 11, p. 15, 2021.

NASCIMENTO, I. G. *et al.* **A utilização de resíduos orgânicos como tecnologia sustentável na sorção de metais pesados em águas residuárias**. 2022.