

# USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS EM PROCESSOS DE REMEDIAÇÃO AMBIENTAL

C. C. S. da Costa, A. J. F. Braga, E. Raphael

*Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia, Manaus, Brasil  
(ccsdc.geq21@uea.edu.br)*

A crescente contaminação de águas, efluentes e solos agrícolas por metais pesados, corantes, pesticidas, fármacos e outros poluentes evidencia a necessidade de tecnologias mais eficientes de remediação ambiental. Este trabalho tem como objetivo apresentar o uso de nanomateriais e nanopartículas magnéticas, seus mecanismos de atuação, como adsorção e separação magnética, bem como suas aplicações, vantagens, limitações e desafios em escala real, através de uma revisão de literatura.

*Palavras-chave:* Nanopartículas magnéticas; Remediação ambiental; Nanomateriais; Separação magnética.

## INTRODUÇÃO

A contaminação de matrizes ambientais, como água e solo, constitui um dos desafios mais relevantes da atualidade, estando associada à presença de diversas classes de poluentes, incluindo metais pesados, corantes, pesticidas e compostos orgânicos. Nesse contexto, os nanomateriais emergem como alternativas promissoras para processos de remediação ambiental, em virtude de suas propriedades intrínsecas à escala nanométrica e da capacidade de interação direta com os contaminantes. Dada a relevância do tema e o interesse científico, diversas pesquisas discutem os principais tipos de nanomateriais empregados nos processos de remediação, suas rotas de síntese e os mecanismos de remoção ou transformação de contaminantes (Asghar *et al.*, 2024; Roy *et al.*, 2021).

No âmbito específico do tratamento de água, a nanotecnologia apresenta-se como uma ferramenta capaz de contribuir não apenas para a remediação, mas também para o sensoriamento, a detecção e o controle da poluição. Santos *et al.* (2019) discutem as aplicações de materiais em nanoescala em processos ambientais, destacando o desenvolvimento de estratégias para a redução de contaminantes em ambientes aquáticos. A versatilidade desses materiais permite, ainda, a funcionalização de suas superfícies para aumentar a seletividade em relação a poluentes específicos, ampliando as possibilidades de aplicação em matrizes complexas.

Entre os nanomateriais estudados, as nanopartículas magnéticas destacam-se pela capacidade de resposta a campos magnéticos, o que facilita sua recuperação após o processo de tratamento. Essa característica é

particularmente relevante, considerando que a separação do material constitui um dos principais desafios do uso de nanomateriais em sistemas ambientais. Estudos magnéticos utilizando óxidos de ferro, como  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  e  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ , têm sido desenvolvidos para a degradação fotocatalítica de corantes sintéticos em meio aquoso, apresentando estratégias inovadoras para a tratativa de efluentes industriais.

Além das aplicações em águas e efluentes, os nanomateriais magnéticos também vêm sendo investigados na remediação de solos contaminados. A literatura discute e revisa abordagens nanotecnológicas para a recuperação de solos agrícolas poluídos e os mecanismos de nanomateriais magnéticos aplicados à remediação de solos contaminados por metais pesados (Zhang, Zhang e Wu, 2024). Smorkalov *et al.* (2023), por sua vez, apresentam um experimento de campo comparando nanopartículas magnéticas e micropartículas do mesmo material aplicados na reabilitação de solo contaminado por diferentes metais.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo revisar o uso de nanopartículas magnéticas em processos de remediação ambiental, com ênfase em suas aplicações no tratamento de água, efluentes e solos contaminados, discutindo os principais mecanismos relatados na literatura, as vantagens apontadas e os desafios ainda existentes para sua aplicação em escala.

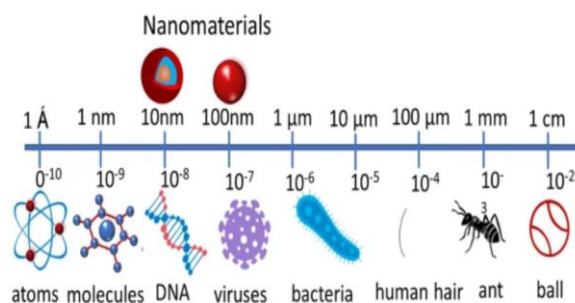
## MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa e caráter exploratório. A pesquisa foi conduzida mediante o levantamento de artigos científicos, revisões sistemáticas e trabalhos acadêmicos relacionados à aplicação de nanomateriais e nanopartículas magnéticas em processos de remediação ambiental. As buscas foram realizadas nas bases de dados ACS Publications, ScienceDirect, SciELO e Google Acadêmico, com emprego dos descritores “nanomateriais”, “nanomagnetismo”, “remediação ambiental”, “nanopartículas magnéticas”, “nanocompósitos” e “tratamento de efluentes”, em português e inglês. Os termos foram combinados mediante operadores booleanos (AND, OR) e expressões entre aspas para busca exata, conforme a especificidade de cada base de dados. Adotaram-se como critérios de inclusão: (i) estudos publicados entre 2018 e 2025; (ii) abordagem direta à aplicação de nanomateriais magnéticos em remediação de água, efluentes ou solos; (iii) disponibilidade do texto completo. Como critérios de exclusão: (i) estudos restritos à síntese de nanomateriais sem aplicação ambiental; (ii) publicações em formato de resumo de evento ou editorial. Após a triagem, os estudos selecionados foram analisados de forma comparativa, com ênfase na identificação dos principais mecanismos de ação, vantagens, limitações e perspectivas relacionadas ao uso de nanopartículas magnéticas em aplicações ambientais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Fundamentos da nanotecnologia

A nanotecnologia tem se destacado nas últimas décadas como um dos campos científicos de maior crescimento e impacto, impulsionada tanto pelo avanço das técnicas de caracterização em escala atômica quanto pela demanda por soluções tecnológicas em setores estratégicos como a indústria, a medicina e o desenvolvimento de novos materiais. Esse campo envolve a manipulação da matéria em escala nanométrica, permitindo a obtenção de estruturas com características diferenciadas e elevado grau de organização molecular. Segundo a literatura, os nanomateriais são definidos como materiais que apresentam pelo menos uma de suas dimensões entre 1 e 100 nm (Figura 1), faixa em que podem surgir propriedades distintas daquelas observadas em materiais em escala macroscópica (Fechine, 2020).



**Figura 1.** Comparação dos materiais comuns com a escala nanométrica. **Fonte:** Asghar *et al.* (2024).

Nesse contexto, a nanociência dedica-se ao estudo das propriedades e fenômenos observados nessa escala, enquanto a nanotecnologia corresponde à aplicação prática desses conhecimentos no desenvolvimento de produtos, processos e dispositivos tecnológicos (Sanfelice *et al.*, 2022). A possibilidade de manipulação atômica e molecular permite a obtenção de materiais com propriedades específicas, ampliando significativamente suas aplicações tecnológicas e industriais.

Os materiais nanoestruturados podem apresentar alterações em propriedades físicas, químicas e magnéticas quando comparados aos materiais convencionais de mesma composição química. Essas mudanças estão associadas principalmente ao aumento da área superficial em relação ao volume das partículas, fator que influencia diretamente fenômenos como reatividade química, atividade catalítica, condutividade elétrica e comportamento magnético (Sanfelice *et al.*, 2022).

### Nanomateriais magnéticos

O nanomagnetismo configura-se como vertente consolidada da nanotecnologia, fundamentada em propriedades emergentes que materiais magnéticos adquirem na escala nanométrica. Quando reduzidos a dimensões nanométricas, compostos como magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) e ferro zero-valente nanoestruturado (nZVI) passam a exibir fenômenos como superparamagnetismo, área superficial elevada e reatividade química intensificada, características que expandem seu espectro de aplicação tecnológica e ambiental. Esse cenário foi viabilizado tanto pelo aprimoramento de rotas sintéticas quanto pela demanda crescente por materiais funcionais em processos sustentáveis de separação e descontaminação.

De acordo com Roy *et al.* (2021), os nanomateriais magnéticos integram propriedades físicas e químicas favoráveis em uma única plataforma: a área superficial elevada potencializa processos de adsorção, enquanto

o comportamento magnético viabiliza a recuperação por campos externos. Complementarmente, Dhanapal *et al.* (2024) destacam que a funcionalização superficial desses materiais incrementa a seletividade e a estabilidade química, ampliando a compatibilidade com diferentes matrizes ambientais.

A redução do tamanho das partículas constitui fator determinante para o desempenho desses materiais. Estudos comparativos em solos contaminados evidenciaram que nanopartículas de magnetita superam micropartículas convencionais na imobilização de metais pesados, principalmente em razão da maior área superficial disponível para interação com os contaminantes (Smorkalov *et al.*, 2023). Consequentemente, propriedades como adsorção, mobilidade e reatividade são diretamente moduladas pelo tamanho da partícula, o que posiciona os nanomateriais magnéticos como candidatos relevantes para intervenções ambientais.

Entre os principais nanomateriais magnéticos empregados na remediação ambiental, a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) destaca-se pela elevada área superficial, alta capacidade de adsorção e facilidade de recuperação por separação magnética, sendo amplamente utilizada na remoção de metais pesados e outros contaminantes (Asghar *et al.*, 2024). Entretanto, sua aplicação pode ser limitada pela tendência à agregação, suscetibilidade à oxidação e possível lixiviação em meios ácidos, fatores que reduzem sua estabilidade operacional. Como estratégia para minimizar essas limitações, diferentes abordagens de funcionalização superficial e o desenvolvimento de nanocompósitos magnéticos têm sido amplamente investigados (Roy *et al.*, 2021).

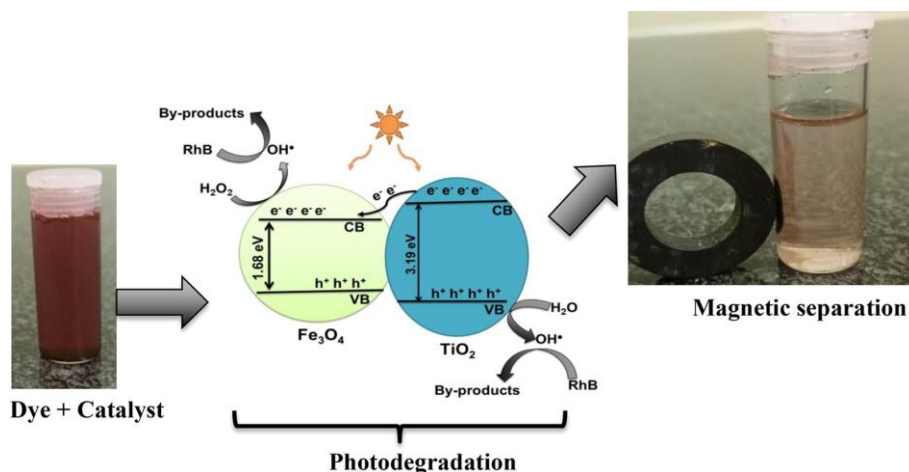
Dentre esses materiais, o sistema  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  combina as propriedades magnéticas da magnetita com a elevada atividade fotocatalítica do  $\text{TiO}_2$ , favorecendo a separação dos portadores de carga, aumentando a

degradação de compostos orgânicos e permitindo a recuperação e reutilização do catalisador após sucessivos ciclos de operação (Madima *et al.*, 2022). De forma complementar, nanocompósitos baseados em  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$  apresentam resultados promissores em processos fotocatalíticos sob luz visível, devido ao menor band gap da ferrita de níquel, que amplia a absorção de radiação visível, melhora a separação dos pares elétron-lacuna e aumenta a estabilidade do sistema fotocatalítico. Contudo, sua obtenção envolve rotas sintéticas mais complexas e ainda há poucos estudos avaliando sua aplicação em condições reais e em larga escala (Patil *et al.*, 2024). Assim, a seleção do nanomaterial mais adequado deve considerar o equilíbrio entre atendimento eficaz à atividade proposta, facilidade de recuperação, estabilidade e viabilidade econômica.

### Aplicação no tratamento de água e efluentes

A remediação ambiental destaca-se como campo de aplicação em expansão para os nanomateriais. Nanopartículas magnéticas permitem a remoção de contaminantes em água, efluentes, solos e águas subterrâneas por meio de adsorção, redução química e fotocatalise. A recuperação magnética pós-tratamento representa vantagem operacional significativa ao reduzir perdas do material utilizado, viabilizar a regeneração e o reuso, e diferenciar esses materiais dos métodos convencionais de separação sólido-líquido, como filtração e sedimentação (Roy *et al.*, 2021).

O potencial fotocatalítico desses sistemas amplia ainda mais suas possibilidades de aplicação. Heteroestruturas como as nanopartículas magnéticas de magnetita funcionalizadas com dióxido de titânio ( $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ ) demonstraram eficiência na degradação de corantes orgânicos, como a Rodamina B, frequentemente empregada como contaminante modelo (Figura 2).



**Figura 2.** Esquema e separação magnética do fotocatalisador durante a fotodegradação do corante rodamina B.  
**Fonte:** Madima *et al.* (2022).

Esses sistemas combinam atividade fotocatalítica com recuperação magnética simplificada, contribuindo para a redução de resíduos secundários e para o aumento da viabilidade operacional da tecnologia (Madima *et al.*, 2022; Patil *et al.*, 2024).

Estudos também demonstram que a combinação entre  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{TiO}_2$  promove um efeito sinérgico entre os processos de fotocatalise heterogênea e foto-Fenton, aumentando a eficiência de degradação de compostos orgânicos quando comparada aos materiais individuais. Além disso, a incorporação de materiais carbonáceos, como o carvão ativado magnético, contribui para o aumento da área superficial disponível e da capacidade de adsorção, favorecendo a aproximação dos contaminantes aos sítios ativos do fotocatalisador. Como consequência, observa-se maior eficiência na degradação de poluentes como azul de metileno e fenol, aliada à facilidade de recuperação e reutilização do nanocompósito, características que reforçam o potencial desses materiais para aplicações em sistemas de tratamento de águas e efluentes em escala laboratorial e piloto (Samsudin *et al.*, 2019).

### Remediação de solos contaminados

A aplicação de nanomateriais magnéticos na remediação de solos tem recebido crescente atenção devido à sua capacidade de minimizar os impactos causados por contaminantes inorgânicos e orgânicos persistentes. Em comparação com métodos convencionais, esses materiais apresentam elevada área superficial, maior número de sítios ativos e propriedades magnéticas que facilitam sua recuperação após o processo de remediação. Além disso, a possibilidade de funcionalização da superfície das nanopartículas permite o desenvolvimento de nanocompósitos com maior seletividade e eficiência na adsorção, imobilização e degradação de diferentes poluentes. Estudos recentes demonstram que nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) apresentam desempenho superior ao de partículas micrométricas na retenção de metais pesados, contribuindo para a redução da biodisponibilidade desses contaminantes e favorecendo a recuperação das propriedades químicas e biológicas do solo. Apesar dos resultados promissores, aspectos relacionados à estabilidade coloidal, agregação das nanopartículas, possíveis efeitos ecotoxicológicos e viabilidade econômica ainda representam desafios para a aplicação desses materiais em escala comercial (Smorkalov *et al.*, 2023; Dhanapal *et al.*, 2024).

No âmbito de solos agrícolas, a nanotecnologia magnética apresenta perspectivas para o manejo de metais pesados, pesticidas, herbicidas e poluentes

persistentes. Esses nanomateriais podem atuar tanto na imobilização quanto na degradação de contaminantes, com potencial de integração a abordagens de nanobiorremediação. Os autores destacam que a funcionalização superficial das nanopartículas e a combinação com materiais orgânicos ou biológicos ampliam sua capacidade de adsorção, aumentam a estabilidade do sistema e favorecem processos de degradação de compostos tóxicos. De forma complementar, Smorkalov *et al.* (2023) demonstram que a eficiência dos nanomateriais magnéticos depende diretamente da composição química, da área superficial e das modificações estruturais realizadas durante sua síntese, fatores que influenciam a imobilização de metais pesados como chumbo, cádmio e arsênio. Todavia, barreiras como a aglomeração de partículas, os efeitos ecotoxicológicos ainda pouco elucidados, a mobilidade ambiental e a escalabilidade dos processos sintéticos limitam a transposição dos resultados obtidos em laboratório para aplicações em campo, evidenciando a necessidade de estudos voltados à avaliação de desempenho em condições reais e ao desenvolvimento de materiais ambientalmente seguros.

### Desafios e perspectivas

Pesquisas recentes apontam que, apesar dos avanços alcançados, a aplicação de nanopartículas magnéticas em processos de remediação ambiental ainda enfrenta limitações importantes. Entre os principais desafios destacam-se a estabilidade dos nanomateriais em diferentes meios, a tendência à aglomeração das partículas, a redução da eficiência após sucessivos ciclos de regeneração, a possibilidade de liberação de íons metálicos e os potenciais efeitos ecotoxicológicos e de bioacumulação decorrentes de sua interação com organismos e ecossistemas. Além disso, questões relacionadas à escalabilidade dos métodos de síntese, aos elevados custos de produção, à manutenção das propriedades físico-químicas durante a produção em larga escala, à padronização dos processos de síntese e caracterização e à ausência de regulamentações específicas ainda dificultam a implementação dessas tecnologias em aplicações industriais e ambientais (Chand; Vasquez-Guardado, 2025).

Sob essa perspectiva, o desenvolvimento de novos nanocompósitos, a otimização das técnicas de funcionalização superficial e a adoção de abordagens que integrem engenharia de materiais, ecotoxicologia e análise de ciclo de vida representam estratégias promissoras para ampliar a segurança e a eficiência desses sistemas. Em conjunto, os estudos analisados demonstram que o nanomagnetismo possui elevado potencial para aplicações em remediação ambiental, especialmente no tratamento de águas, efluentes e



solos contaminados. Entretanto, a consolidação dessa tecnologia dependerá da realização de pesquisas que conciliem elevado desempenho, viabilidade econômica e segurança ambiental, permitindo sua aplicação sustentável em escala real.

### CONCLUSÃO

Os estudos analisados nesta revisão bibliográfica evidenciam que as nanopartículas magnéticas funcionalizadas constituem uma alternativa promissora para a remediação ambiental, com potencial de aplicação no tratamento de águas, solos contaminados e, em menor escala, na mitigação de poluentes atmosféricos. As propriedades intrínsecas desses materiais, como elevada área superficial, alta capacidade de adsorção, atividade fotocatalítica e possibilidade de recuperação por separação magnética, favorecem a remoção de metais pesados, corantes orgânicos e outros contaminantes persistentes. Além disso, a formação de nanocompósitos, especialmente aqueles baseados em  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ , potencializa a eficiência dos processos fotocatalíticos ao combinar a atividade do semicondutor com a facilidade de recuperação do material, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis e eficientes para o tratamento ambiental.

Apesar dos avanços observados, a análise da literatura demonstra que a consolidação dessas tecnologias em escala real ainda depende da superação de importantes desafios, como a redução dos custos de produção, a manutenção da estabilidade e da eficiência dos nanomateriais após sucessivos ciclos de uso, bem como a avaliação de seus potenciais impactos ecotoxicológicos e ambientais. Nesse contexto, pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais mais seguros, reutilizáveis e economicamente viáveis, aliadas à realização de estudos em condições reais de operação e à avaliação de seu ciclo de vida, serão fundamentais para ampliar a aplicabilidade dessas tecnologias. Dessa forma, conclui-se que o nanomagnetismo representa uma estratégia inovadora e de elevado potencial para a remediação ambiental, cujo avanço dependerá da integração entre o desenvolvimento de novos materiais, a validação experimental em escala ampliada e a garantia de sua sustentabilidade ambiental.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Pesquisa ILUM, à Escola Superior de Tecnologia (EST) e à Universidade do Estado do Amazonas (UEA) pelo suporte técnico e institucional que possibilitou o desenvolvimento desta revisão bibliográfica.

### REFERÊNCIAS

- ASGHAR, Nosheen; HUSSAIN, Alamdar; NGUYEN, Duc Anh; ALI, Salar; HUSSAIN, Ishtiaque; JUNEJO, Aurangzeb; ALI, Attarad. Advancement in nanomaterials for environmental pollutants remediation: a systematic review on bibliometrics analysis, material types, synthesis pathways, and related mechanisms. *Journal of Nanobiotechnology*, v. 22, artigo 26, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12951-023-02151-3>.
- CHAND, Kishore; VASQUEZ-GUARDADO, Erick S. Magnetic Nanoparticles: Synthesis and Applications in Life Sciences. *ChemistryOpen*, v. 14, n. 12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/open.202500214>.
- DHANAPAL, Anand Raj; THIRUVENGADAM, Muthu; VAIRAVANATHAN, Jayavarshini; VENKIDASAMY, Baskar; EASWARAN, Maheswaran; GHORBANPOUR, Mansour. Nanotechnology approaches for the remediation of agricultural polluted soils. *ACS Omega*, v. 9, n. 12, p. 13522-13533, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09776>.
- FECHINE, Pierre Basílio Almeida (org.). Avanços no desenvolvimento de nanomateriais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020. (Estudos da Pós-Graduação). ISBN 978-65-991493-7-5.
- MADIMA, Ntakadzeni; KEFENI, Kebede K.; MISHRA, Shivani B.; MISHRA, Ajay K.; KUVAREGA, Alex T. Fabrication of magnetic recoverable  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  heterostructure for photocatalytic degradation of rhodamine B dye. *Inorganic Chemistry Communications*, v. 145, artigo 109966, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109966>.
- PATIL, Pratik S.; UBALE, Yogesh P.; GAWALI, Sudarshan S.; PAI, Mrinal R.; JADHAV, K. M. Hybrid magnetic nanocomposite  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$  for photocatalytic dye degradation and green hydrogen ( $\text{H}_2$ ) generation. *Ceramics International*, v. 50, n. 24, parte B, p. 54155-54173, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.272>.
- ROY, Arpita; SHARMA, Apoorva; YADAV, Saanya; JULE, Leta Tesfaye; KRISHNARAJ, Ramaswamy. Nanomaterials for remediation of environmental pollutants. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, v. 2021, artigo 1764647, p. 1-16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/1764647>.
- SAMSUDIN, M. F. R. *et al.* Synthesis of  $\text{MgAC-Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  hybrid nanocomposites via sol-gel chemistry for water treatment by photo-Fenton and photocatalytic reactions. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 13830, 2019. DOI: [10.1038/s41598-019-48398-5](https://doi.org/10.1038/s41598-019-48398-5).
- SANFELICE, Rafaela Cristina; PAVINATTO, Adriana; CORRÊA, Daniel Souza (org.). Nanotecnologia aplicada a polímeros. São Paulo: Blucher, 2022. 616 p. ISBN 978-65-5550-252-7. DOI: [10.5151/9786555502527](https://doi.org/10.5151/9786555502527).
- SANTOS, Tássia Rhuna Tonial dos; MATEUS, Gustavo Affonso Pisano; SILVA, Marcela Fernandes; BERGAMASCO, Rosângela. Aplicação da nanotecnologia no tratamento de água: uma revisão. *Revista UNINGÁ Review, Maringá*, v. 34, n. 2, p. 51-72, abr./jun. 2019.

---

SMORKALOV, Ivan A.; VOROBELCHIK, Evgenii L.; DZERANOV, Artur A.; PANKRATOV, Denis A.; DOVLETYAROVA, Elvira A.; YÁÑEZ, Carolina; NEAMAN, Alexander. Field experiment pitting magnetite nanoparticles against microparticles: effect of size in the rehabilitation of metal-contaminated soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 47, e0230017, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbc20230017>.

ZHANG, Yuenan; ZHANG, Yujie; WU, Aiguo. Design and construction of magnetic nanomaterials and their remediation mechanisms for heavy metal contaminated soil. *Science of The Total Environment*, v. 951, artigo 175369, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175369>.