

REMOÇÃO DE ÍONS METÁLICOS EM ÁGUAS POR MEIO DO USO DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS

Rafaella Domingues Hilário de Paula*

Vanessa Nunes Alves*

Resumo: O presente trabalho consiste em uma revisão de literatura sobre o uso de materiais lignocelulósicos para remoção de íons metálicos presentes em águas. Para a quantificação desses íons, os estudos analisados empregaram diferentes técnicas analíticas, com destaque para a espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS), reconhecida por sua elevada sensibilidade e baixos limites de detecção. Essa característica torna a técnica especialmente adequada para a avaliação da eficiência em estudos de adsorção. A importância deste estudo para a área ambiental está em demonstrar uma alternativa sustentável e economicamente viável para a remediação da contaminação hídrica por metais pesados. A utilização de subprodutos agroindustriais como adsorventes contribui para a valorização de resíduos e para o desenvolvimento de tecnologias limpas, promovendo a preservação dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Materiais lignocelulósicos; Íons metálicos; Remediação de águas; ICP-MS.

INTRODUÇÃO

A contaminação das águas por íons metálicos é uma realidade que traz muitos prejuízos à sociedade. Isso ocorre devido aos efeitos tóxicos, bem como à persistência desses contaminantes e à sua acumulação nos ecossistemas. Em geral, tais contaminações são provenientes de indústrias, das atividades de mineração e da agropecuária. Também podem ter origem no descarte inadequado de resíduos, podendo comprometer a qualidade da água destinada para consumo humano e a vida aquática.

Além dos impactos ambientais, a presença de íons metálicos na água representa um sério problema de saúde pública. A ingestão contínua de água contaminada pode ocasionar distúrbios neurológicos, danos renais, alterações no

* Instituto de Química – UFCAT: rafadpaula@yahoo.com.br, vanessa.nunes@ufcat.edu.br

sistema cardiovascular e outros efeitos adversos à saúde humana, dependendo do tipo de metal e da concentração presente (ALLOWAY, 2013). Dessa forma, torna-se indispensável o monitoramento da qualidade da água e a implementação de métodos eficientes de tratamento.

As tecnologias empregadas para a remoção de íons metálicos como troca iônica e filtração por membranas, apesar de serem eficazes, apresentam limitações relacionadas ao alto custo operacional, à complexidade dos processos e à geração de resíduos secundários (FU; WANG, 2011). Nesse contexto, a busca por alternativas sustentáveis, eficientes e de baixo custo tem se intensificado.

Entre as técnicas disponíveis, a adsorção tem se destacado por sua simplicidade, eficiência e opções econômicas. O uso de materiais lignocelulósicos como adsorventes surge como uma alternativa promissora, uma vez que esses materiais são abundantes, renováveis e, em sua maioria, provenientes de resíduos agroindustriais. Além disso, sua aplicação contribui para a valorização de resíduos sólidos e para o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis (AHMARUZZAMAN, 2011).

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão de literatura sobre a utilização de materiais lignocelulósicos na remoção de íons metálicos em águas, destacando o papel de técnicas analíticas, especialmente da espectrometria de massa com acoplamento de plasma indutivamente (ICP-MS) como ferramenta fundamental para a quantificação e avaliação da eficiência desses processos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Íons metálicos em ambientes aquáticos

Os íons metálicos são um grupo de elementos químicos amplamente reconhecidos por seus efeitos adversos ao meio ambiente e à saúde humana. Diferentemente de muitos poluentes orgânicos, esses elementos não sofrem manipulação natural, o que favorece sua permanência prolongada em ecossistemas aquáticos. A introdução desses contaminantes nos corpos d'água ocorre, principalmente, por meio de atividades industriais, processos de mineração, uso

intensivo de insumos agrícolas e descarte inadequado de efluentes e resíduos sólidos (ALLOWAY, 2013).

Uma vez apresentado no ambiente aquático, esses íons tendem a se distribuir entre a coluna de água, os sedimentos e os organismos vivos. Esse comportamento favorece processos de bioacumulação e biomagnificação, nos quais a concentração do contaminante aumenta progressivamente ao longo da cadeia alimentar. Como consequência, organismos de níveis tróficos superiores, incluindo os seres humanos, tornam-se mais suscetíveis aos efeitos tóxicos desses elementos (TCHOUNWOU *et al.*, 2012).

Entre os íons metálicos mais frequentemente associados à contaminação hídrica destacam-se o chumbo (Pb^{2+}), o cádmio (Cd^{2+}), o mercúrio (Hg^{2+}) e o cromo ($Cr(VI)$). O chumbo apresenta efeitos neurotóxicos importantes, enquanto o cádmio está relacionado a danos renais e ósseos. O mercúrio em sua forma orgânica é altamente tóxico e pode causar sérios danos ao sistema nervoso. Já o cromo hexavalente possui elevado potencial cancerígeno, reforçando a necessidade de sua remoção das águas (ALLOWAY, 2013).

Técnicas de remediação e adsorção

Diversas técnicas foram empregadas no tratamento de águas contaminadas por metais, incluindo processos de oxidação-redução, troca iônica e separação por membranas. Apesar de apresentarem boa eficiência, muitos desses métodos possuem limitações associadas ao elevado custo, à complexidade operacional e à geração de subprodutos potencialmente poluidores (FU; WANG, 2011).

Nesse contexto, a adsorção se destaca como uma alternativa amplamente estudada e aplicada, principalmente por sua simplicidade, eficiência e flexibilidade operacional. O processo baseia-se na retenção de íons metálicos na superfície de um material sólido, denominado adsorvente, por meio de interações físicas e químicas. Além disso, a adsorção permite a remoção de contaminantes mesmo quando presentes em concentrações baixas, característica essencial para aplicações ambientais (DEMIRBAS, 2008).

Tradicionalmente, o carvão ativado é o adsorvente mais utilizado nesses processos, devido à sua elevada área superficial e capacidade de retenção. No

entanto, o seu alto custo de produção e regeneração limita a sua aplicação em larga escala, especialmente em países em desenvolvimento. Dessa forma, a busca por materiais alternativos, de menor custo e origem renovável, tem sido amplamente incentivada (BABEL; KURNIAWAN, 2003).

Materiais lignocelulósicos como alternativa sustentável

Os materiais lignocelulósicos têm recebido atenção crescente como adsorventes alternativos para a remoção de íons metálicos em águas. Esses materiais são compostos principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, polímeros naturais abundantes em resíduos agrícolas e florestais. A estrutura química desses componentes confere aos materiais uma grande quantidade de grupos funcionais capazes de interagir com íons metálicos em solução aquosa (HUBBE *et al.*, 2011).

A presença de grupos hidroxila, carboxila e fenólicos favorecem mecanismos de adsorção como troca iônica, complexação e ligações de hidrogênio. Esses mecanismos tornam os materiais lignocelulósicos eficientes na remoção de diferentes íons metálicos, mesmo sem etapas envolvendo tratamentos químicos complexos. Além disso, sua abundância e baixo custo os tornam particularmente atrativos do ponto de vista econômico e ambiental.

Diversos resíduos agroindustriais foram avaliados quanto ao seu potencial adsorvente, incluindo bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, serragem, fibras vegetais e resíduos de processamento de frutas. Estudos indicam que esses materiais podem apresentar desempenho semelhante ao de adsorventes comerciais, dependendo das condições experimentais adotadas (CRINI, 2006).

Outro aspecto relevante é a possibilidade de aprimoramento da capacidade adsorvente de materiais lignocelulósicos por meio de tratamentos físicos ou químicos simples, como ativação térmica ou modificação química. Essas estratégias permitem aumentar a área superficial e a disponibilidade de sítios ativos, ampliando a eficiência do processo de adsorção (AHMARUZZAMAN, 2011).

Importância das técnicas analíticas na avaliação da adsorção

A avaliação da eficiência dos materiais lignocelulósicos na remoção de íons metálicos depende diretamente da utilização de técnicas analíticas sensíveis e

confiáveis. Nesse contexto, a espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) destaca-se como uma das principais ferramentas empregadas em estudos ambientais. Essa técnica permite a detecção simultânea de diversos metais, mesmo em concentrações extremamente baixas, com elevada precisão e reprodutibilidade (LINDHOLM-LEHTO, 2019).

A aplicação do ICP-MS possibilita uma análise detalhada da eficiência dos processos de adsorção, contribuindo para a compreensão dos mecanismos envolvidos e para a comparação entre diferentes materiais adsorventes. Dessa forma, o uso dessa técnica fortalece a confiabilidade dos resultados apresentados nos estudos revisados e subsidia o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para a remediação de águas contaminadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo é uma revisão de literatura, de natureza qualitativa, cujo objetivo foi analisar trabalhos científicos relacionados ao uso de materiais lignocelulósicos na remoção de íons metálicos em águas. A pesquisa bibliográfica foi realizada em bases de dados científicos como Science Direct, Scopus, Web of Science e Google Scholar.

Foram usados termos relacionados ao tema, incluindo “materiais lignocelulósicos”, “íons metálicos”, “remediação de águas”, “adsorção” e “ICP-MS”. Os critérios de inclusão abrangeram artigos publicados entre os anos de 2000 e 2025, que abordaram o uso desses materiais na remoção de íons metálicos.

A busca inicial resultou em um conjunto amplo de publicações, a partir do qual foi realizada uma análise qualitativa e descritiva da literatura, com foco nas principais tendências, abordagens metodológicas e técnicas analíticas empregadas nos estudos consultados. Após a aplicação dos critérios de seleção, foram identificados e analisados 11 artigos científicos, os quais compõem esse trabalho de revisão.

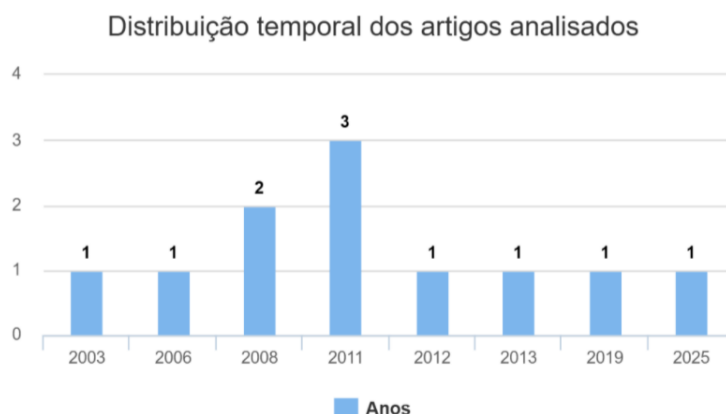
A análise dos estudos foi conduzida de forma descritiva, considerando aspectos como o tipo de material lignocelulósico utilizado, a necessidade ou não de modificações químicas ou físicas, os íons metálicos investigados e as técnicas

analíticas empregadas para quantificação, com maior atenção para a espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente.

RESULTADOS

A análise dos estudos revelou uma constância de publicações ao longo dos anos, evidenciando interesse científico contínuo por adsorventes de origem lignocelulósica, conforme apresentado na Figura 1.

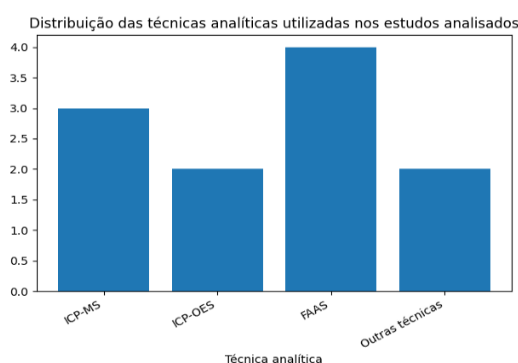
Figura 1 – Distribuição temporal dos artigos analisados



Fonte: elaborado pelos autores

Observou-se que apesar do grande uso do ICP-MS como técnica de detecção nos estudos analisados, também foi recorrente a utilização de técnicas como espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS), espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) entre outras, conforme figura 2.

Figura 2 – Distribuição das técnicas analíticas utilizadas nos estudos analisados

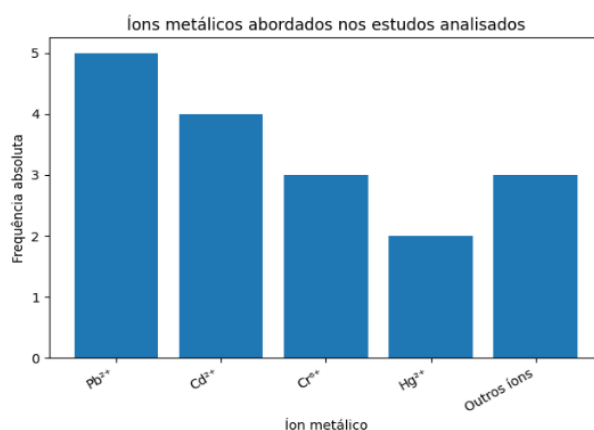


Fonte: elaborado pelos autores

Verificou-se que a utilização do ICP-MS permitiu a quantificação precisa dos metais antes e após o processo de adsorção, evidenciando a elevada sensibilidade da técnica para aplicações ambientais. Essa característica é fundamental para a avaliação de processos de remediação, especialmente quando os contaminantes estão presentes em níveis menores (OSUNA *et al.*, 2025).

Os íons metálicos mais frequentemente investigados nos estudos consultados foram Pb^{2+} , Cd^{2+} , $Cr(VI)$ e Hg^{2+} , refletindo sua significativa toxicidade e ampla ocorrência como contaminantes de águas, conforme a figura a seguir:

Figura 3 – Íons metálicos abordados nos estudos analisados



Fonte: elaborado pelos autores

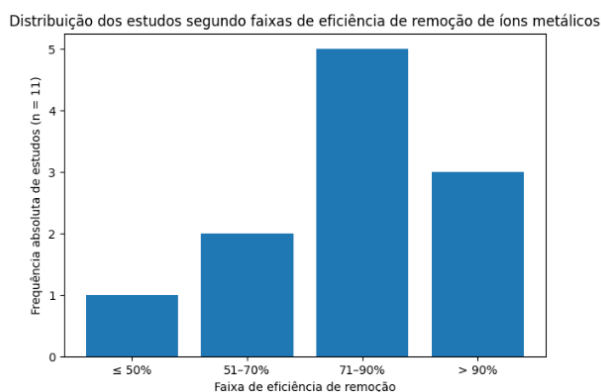
De modo geral, os resultados indicam que os materiais lignocelulósicos apresentam desempenho distinto ao dos adsorventes comerciais, podendo ter menor capacidade específica, porém, têm a vantagem de serem de menor custo e menor impacto ambiental. Além disso, a possibilidade de regeneração desses materiais contribui para a sustentabilidade do processo (DEMIRBAS, 2008).

Parte dos estudos relatou o uso de materiais lignocelulósicos submetidos a modificações físicas ou químicas, os quais, de modo geral, apresentaram maior capacidade de adsorção quando comparados aos materiais utilizados sem tratamento prévio. Entretanto, os materiais in natura destacam-se pelo menor custo e menor impacto ambiental.

Conforme figura 4, os estudos analisados demonstram que os materiais lignocelulósicos apresentam elevada eficiência na remoção de metais tóxicos,

podendo atingir valores superiores a 90% em condições adequadas. Essa eficiência está relacionada às propriedades químicas e estruturais dos materiais, bem como às condições experimentais, como pH, tempo de contato e concentração inicial do metal (VULLO *et al.*, 2008).

Figura 4 – Porcentagem de eficiência de remoção dos estudos analisados



Fonte: elaborado pelos autores

CONCLUSÕES

A partir da revisão da literatura realizada, conclui-se que os materiais lignocelulósicos são uma alternativa eficiente, sustentável e economicamente viável para a remoção de metais pesados em águas contaminadas por íons metálicos. Sua ampla disponibilidade e a presença de grupos funcionais capazes de interagir com estes metais tornam tais materiais especialmente promissores para aplicações ambientais.

A utilização da espectrometria de massa com acoplamento de plasma indutivamente (ICP-MS) mostrou-se muito utilizada para a avaliação da eficiência dos processos de adsorção, garantindo resultados precisos e confiáveis. Desta forma, o uso combinado de materiais lignocelulósicos e técnicas analíticas avançadas contribui significativamente para o desenvolvimento de estratégias eficazes de remediação hídrica.

Dessa maneira, destaca-se a importância de estudos futuros direcionados à aplicação desses materiais em condições reais de tratamento, por meio de suas contribuições como tecnologia limpa e acessível para a preservação dos recursos

hídricos. Essa medida é de grande importância para as políticas públicas de recuperação ambiental, pois trata-se de qualidade da água, um bem de uso público e finito, de grande relevância para a saúde pública.

REFERÊNCIAS

- AHMARUZZAMAN, M. Resíduos industriais como potenciais adsorventes de baixo custo para o tratamento de águas residuais carregadas com metais pesados. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 166, n. 1–2, p. 36–59, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773207X2400054X>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2025.
- ALLOWAY, B. J. Metais pesados em solos: metais-traço e metaloides em solos e sua biodisponibilidade. 3ª ed. **Dordrecht: Springer**, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-4470-7>> Acesso em: 15 de dezembro de 2025.
- BABEL, S.; KURNIAWAN, T. A. Adsorventes de baixo custo para a remoção de metais pesados de água contaminada: uma revisão. **Revista de Materiais Perigosos**, Amsterdam, v. 97, Ed. 1–3, p. 219–243, 2003. Disponível em: <https://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/lecture/gss/SBabel/E3-20130118PM/Hazardous%20material_2003.pdf?> Acesso em: 17 dezembro de 2025.
- CRINI, G. Adsorventes não convencionais de baixo custo para remoção de corantes: uma revisão. **Tecnologia de Bio-recursos**, Amsterdam, v. 97, Ed. 9, p. 1061–1085, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>> Acesso em: 17 de dezembro de 2025.
- DEMIRBAS, A. Adsorção de metais pesados em materiais residuais agroindustriais: uma revisão. **Revista de Materiais Perigosos**, Amsterdam, v. 157, Ed. 2–3, p. 220–229, 2008. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389408000629?>>

Acesso em: 15 de dezembro de 2025.

FU, F.; WANG, Q. Remoção de íons de metais pesados de águas residuais: uma revisão. **Revista de Gestão Ambiental**, Londres, v. 92, n. 3, p. 407–418, 2011.

Disponível

em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479710004147?>>

Acesso em: 30 de dezembro de 2025.

HUBBE, MA; HASAN, SH; DUCOSTE, JJ. Substratos celulósicos para remoção de poluentes de sistemas aquosos: uma revisão. **Bio Recursos**, Raleigh, v. 6, n. 2, p. 2161–2287, 2011. Disponível em: <

<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/cellulosic-substrates-for-removal-of-pollutants-from-aqueous-systems-a-review-1-metals/?>> Acesso em: 15 de dezembro de 2025.

LINDHOLM-LEHTO, P. Biossorção de metais pesados por biomassa lignocelulósica e análise química. **Bio Recursos**, Raleigh, v. 14, n. 2, p. 4952–4995, 2019. Disponível em: < <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/biosorption-of-heavy-metals-by-lignocellulosic-biomass-and-chemical-analysis/?>> Acesso em: 30 de dezembro de 2025.

OSUNA, F. J. *et al.* Adsorção de metais pesados multicomponentes em micas inchadas funcionalizadas: insights mecanísticos e evolução estrutural. **Superfícies e Interfaces**, Amsterdam, v. 72, p. 106996, 2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468023025012520>> Acesso em: 15 dezembro de 2025.

TCHOUNWOU, P.B. *et al.* Toxicidade de metais pesados e o meio ambiente. **EXS**, Basel, v. 101, p. 133–164, 2012. Disponível em: <<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4144270/?>> Acesso em: 15 de dezembro de 2025.

VULLO, DL et al. Biossorção de metais pesados utilizando biomassa de *Ochrobactrum anthropi*. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 155, n. 3, p. 490–498, 2008. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12835060/>> Acesso em: 15 de dezembro de 2025.