

PRODUÇÃO DE *BIOCHARS* A PARTIR DE RESÍDUO DE CAFÉ PARA REMOÇÃO DE ATRAZINA E 2,4-D EM SOLUÇÃO AQUOSA

Kevin Felipe Ramos¹.

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), SJRP, SP.

lattes.cnpq.br/361507304408402

RESUMO: A contaminação de recursos hídricos por herbicidas, como atrazina (AT) e ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), tem despertado crescente preocupação ambiental devido à elevada persistência, mobilidade e potencial tóxico desses compostos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo produzir *biochars* a partir de resíduos agroindustriais de café e avaliar sua aplicação como adsorventes na remoção desses herbicidas em solução aquosa. Os materiais foram obtidos por pirólise a 600 °C, seguida de ativação química com NaOH, originando as amostras GC e GCA. As caracterizações por FTIR e potencial zeta indicaram alterações superficiais associadas à ativação alcalina, favorecendo a formação de sítios ativos para adsorção. Os ensaios adsorptivos demonstraram elevadas eficiências de remoção utilizando 1,0 g de adsorvente, com rápido equilíbrio cinético. Os dados experimentais ajustaram-se predominantemente ao modelo cinético de pseudo-segunda ordem e à isoterma de *Freundlich*, sugerindo mecanismo de quimiossorção em superfície heterogênea. O processo apresentou maior eficiência a 25 °C e os materiais mantiveram desempenho satisfatório por até três ciclos consecutivos de reutilização. Assim, os *biochars* produzidos mostraram-se alternativas sustentáveis e promissoras para remoção de herbicidas em meio aquoso.

PALAVRAS-CHAVE: Biossorção. Contaminantes emergentes. Resíduos agroindustriais

PRODUCTION OF *BIOCHARS* FROM COFFEE RESIDUES FOR THE REMOVAL OF ATRAZINE AND 2,4-D FROM AQUEOUS SOLUTION

ABSTRACT: The contamination of water resources by herbicides such as atrazine (AT) and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) has become an increasing environmental concern due to the high persistence, mobility, and toxic potential of these compounds. In this context, the present study aimed to produce *biochars* from agro-industrial coffee residues and evaluate their application as adsorbents for the removal of these herbicides from aqueous solutions. The materials were obtained by pyrolysis at 600 °C, followed by chemical activation with NaOH, resulting in the GC and GCA samples. FTIR and zeta potential analyses revealed

surface modifications associated with alkaline activation, favoring the formation of active adsorption sites. Adsorption assays demonstrated high removal efficiencies using 1.0 g of adsorbent, with rapid kinetic equilibrium. The experimental data were better fitted to the pseudo-second-order kinetic model and the *Freundlich* isotherm, suggesting a chemisorption mechanism on a heterogeneous surface. The adsorption process showed higher efficiency at 25 °C, and the materials maintained satisfactory performance for up to three consecutive reuse cycles. Therefore, the produced biochars proved to be sustainable and promising alternatives for herbicide removal from aqueous media.

KEY-WORDS: Biosorption. Emerging contaminants. Agro-industrial residues.

INTRODUÇÃO

A crescente intensificação das atividades agrícolas e industriais tem ampliado significativamente a liberação de contaminantes emergentes nos recursos hídricos, comprometendo a qualidade da água e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. Compostos como herbicidas frequentemente detectados em corpos hídricos provenientes de processos de lixiviação e escoamento superficial, apresentam potencial de bioacumulação e toxicidade, tornando-se uma preocupação relevante para a saúde humana e ambiental (Mojiri *et al.*, 2019; Dotto & McKay, 2020).

A atrazina e o ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), destacam-se pela elevada estabilidade química e pelos impactos associados à sua permanência no ambiente. A atrazina pertence ao grupo das triazinas e apresenta baixa biodegradabilidade, o que favorece sua persistência em solos e águas subterrâneas. Além disso, estudos apontam efeitos carcinogênicos e desregulação endócrina relacionados à exposição prolongada a esse composto (Amézquita-Marroquín *et al.*, 2020). O herbicida 2,4-D, amplamente empregado no controle seletivo de plantas daninhas, possui elevada mobilidade em meio aquoso e também apresenta potencial tóxico para organismos aquáticos e humanos, sendo classificado pela Organização Mundial da Saúde como possivelmente carcinogênico (Castro *et al.*, 2025). Em razão dessas características, a presença contínua desses herbicidas em ambientes aquáticos representa um importante desafio ambiental, sobretudo em regiões com forte atividade agrícola. Diante desse problema, diferentes tecnologias vêm sendo investigadas para remoção de contaminantes orgânicos em água, incluindo processos oxidativos avançados, filtração por membranas, degradação biológica e métodos físico-químicos. Embora muitos desses tratamentos apresentem elevada eficiência, parte deles ainda possui limitações relacionadas ao custo operacional, consumo energético e geração de subprodutos potencialmente tóxicos (Brillas, 2021; Saleh *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a adsorção destaca-se devido à simplicidade operacional, alta eficiência e possibilidade de aplicação em diferentes condições, além da capacidade do processo adsorptivo em remover contaminantes em baixas concentrações, sem promover alterações significativas na matriz aquosa. A regeneração do adsorvente e a redução

na formação de resíduos secundários tornam essa técnica particularmente atrativa para aplicações ambientais (Dotto & McKay, 2020).

Paralelamente ao avanço das tecnologias de adsorção, o aproveitamento de resíduos agroindustriais para produção de materiais adsorventes tem despertado crescente interesse científico. Os resíduos provenientes da cadeia produtiva do café destacam-se nesse contexto devido à elevada disponibilidade e à composição lignocelulósica rica em grupos funcionais oxigenados. A conversão desses resíduos em biocarvão, por meio de processos de pirólise e ativação química, permite a obtenção de materiais com elevada área superficial, porosidade e diversidade de sítios ativos, características importantes para aplicações adsorptivas. Além do potencial de remoção, esses materiais apresentam vantagens econômicas e ambientais em comparação ao carvão ativado comercial, cuja produção envolve custos mais elevados (BOCÇA *et al.*, 2023).

OBJETIVO

O objetivo do presente estudo pautou-se na produção de *biochars*, a partir de resíduos de café, como potenciais adsorventes na remoção dos herbicidas atrazina e do ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) em meio aquoso.

METODOLOGIA

Os resíduos de café moído, provenientes de uma indústria de processamento cafeeiro, foram inicialmente lavados com água deionizada e secos em estufa com circulação de ar a 60 °C por 24 h. Posteriormente, o material foi submetido à pirólise em forno tubular (*PyroTech, Namyangju-si*, Coreia), a 600 °C por 2 h, sob atmosfera de N₂ (vazão de 0,25 L min⁻¹) e taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹, obtendo-se a fração matriz denominada GC. Uma porção previamente definida do GC foi submetida à ativação química utilizando solução de hidróxido de sódio 5% (NaOH 5%), sob agitação moderada à temperatura ambiente por 2 h. Em seguida, o material foi seco em estufa a 100 °C por 12 h, originando o material ativado denominado GCA. Os materiais obtidos foram peneirados em malha de 100 mesh, visando garantir uniformidade granulométrica.

A caracterização química e superficial dos materiais foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), utilizando espectrômetro *Perkin Elmer* modelo *Frontier*, bem como por análise de potencial zeta (ZP), com o objetivo de determinar as propriedades de carga superficial dos adsorventes, empregando-se analisador *Zetasizer Nano* (Malvern, ZS90).

Os ensaios de adsorção foram conduzidos em sistema de batelada, sob agitação termostatzada (SP Labor Ltda.) a 180 rpm, em temperatura ambiente. Para cada experimento, utilizaram-se 10 mL de solução sintética contendo os herbicidas Atrazina (2-cloro-4-etilamino-6-isopropilamino-1,3,5-triazina; C₈H₁₄ClN₅) e 2,4-D (ácido

2,4-diclorofenoxiacético; $C_8H_6Cl_2O_3$), em pH natural e concentração inicial de 5 mg L^{-1} . Todos os ensaios foram realizados em triplicata. Nos experimentos de influência da massa adsorvente, foram empregadas quantidades de 0,5 e 1,0 g dos materiais. Após o período de contato, as amostras foram filtradas e as concentrações finais determinadas por espectrofotometria UV-Vis (*Shimadzu 2600i/2700i*), nos comprimentos de onda de 222 nm e 284 nm, correspondentes aos herbicidas atrazina e 2,4-D, respectivamente. A partir dos resultados obtidos, foram calculadas a eficiência de remoção do contaminante (**Equação 1**) e a capacidade adsortiva por unidade de massa do material (Q_e , mg g^{-1}) (**Equação 2**).

$$\%R = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \cdot V}{W} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo: C_o (concentração inicial do adsorbato na solução ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); C_e (concentração no equilíbrio do adsorbato em solução ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); q_e ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) (capacidade de adsorção); W (massa seca do adsorvente (mg)); V (volume final da solução do adsorbato (mL)).

Os estudos cinéticos de adsorção foram conduzidos mediante coleta de alíquotas da solução nos intervalos de 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90 e 120 min, com a finalidade de determinar o tempo de equilíbrio do sistema, posteriormente empregado nos experimentos subsequentes. Os dados experimentais obtidos foram ajustados aos modelos cinéticos não lineares de pseudo-primeira ordem (PPO) e pseudo-segunda ordem (PSO).

A influência do pH no processo adsortivo foi avaliada em faixa compreendida entre 2 e 10, sendo os ajustes realizados mediante adição de soluções de HCl ou NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$. Os estudos de equilíbrio foram realizados utilizando concentrações iniciais do analito entre 5 e 10 mg L^{-1} . Após o equilíbrio, as concentrações residuais das soluções foram determinadas para estimativa da capacidade de adsorção dos materiais. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de isothermas de *Langmuir* e *Freundlich* por regressão linear.

Os parâmetros termodinâmicos do processo foram investigados em temperaturas de 25, 35 e 45°C , utilizando a concentração previamente definida nos ensaios de equilíbrio. As suspensões permaneceram sob agitação constante de 180 rpm em banho termostático até o estabelecimento do equilíbrio adsortivo.

A reutilização do adsorvente foi avaliada por meio de ciclos sucessivos de regeneração e adsorção. Inicialmente, o material adsorvente foi regenerado em estufa a 300 °C por 2 h, visando à remoção dos analitos adsorvidos. Posteriormente, a fração do material que apresentou maior capacidade adsorptiva foi colocada em contato com a solução contendo o analito durante 240 min, a 25 °C, sob agitação constante. No final de cada ciclo, a concentração residual dos analitos foi determinada por espectroscopia UV-Vis nos respectivos comprimentos de onda de máxima absorção. O procedimento foi repetido por cinco ciclos consecutivos, empregando-se, em cada etapa, o adsorvente previamente regenerado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise das caracterizações dos materiais

Para determinar as propriedades de carga superficial do adsorvente, realizou-se a análise de potencial zeta (ZP) utilizando o analisador *Zetasizer Nano* (Malvern, ZS90). Os resultados indicaram valores de -2,4 e -13,7 mV para as amostras GC e GCA, respectivamente. Considerando que a ativação química alcalina do material, pode favorecer a formação de grupos funcionais de caráter básico na superfície do adsorvente (Zhao *et al.*, 2018), observa-se, conseqüentemente, uma tendência ao aumento do valor do pH do ponto de carga zero (pH_{PCZ}) do material. Tal resultado, corrobora com as principais bandas observadas nos espectros de FT-IR, em que se verificou uma redução dos grupos funcionais responsáveis pela diminuição da carga superficial.

Em suma, todas as amostras apresentaram alongamento vibracional reduzido em 3444 cm^{-1} corresponde a ligação OH presente na lignina e hemicelulose, devido a ocorrência de uma reação de desidratação na celulose posterior ao processo de pirólise do material (Zhou *et al.*, 2018; Meili *et al.*, 2019).

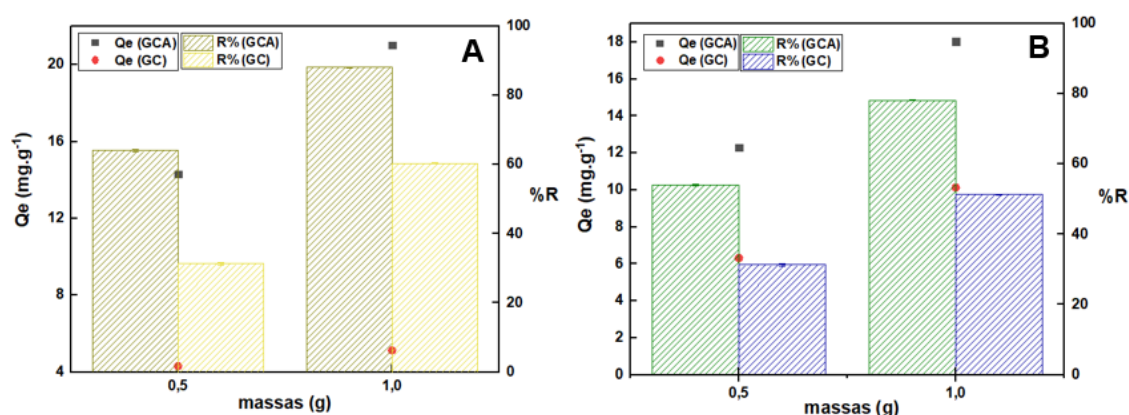
A banda em aproximadamente 1510 cm^{-1} , associada às vibrações de estiramento **C=C de estruturas aromáticas da lignina**, foi observada em todas as amostras, de forma a indicar a presença de estruturas aromáticas remanescentes ou formadas durante o processo térmico. Verificou-se uma banda em 1740 cm^{-1} , indicativa da presença de grupos funcionais acetil e éster, entretanto, essa banda se apresentou menos intensa nos espectros da amostra GCA, sugerindo que o tratamento alcalino removeu de forma mais eficaz uma proporção maior de hemicelulose e lignina (Ahuia; Kaushik; Singh, 2018).

Em contrapartida, devido ao tratamento térmico aplicado, verificou-se redução dos alongamentos vibracionais, em aproximadamente 1650 cm^{-1} , 2920 cm^{-1} e 1052 cm^{-1} , nas amostras, os quais podem ser atribuídas, respectivamente, às vibrações do estiramento **C=O** ou à deformação da água adsorvida na estrutura da celulose, C-H, **C-O** e **C-O-C** características de polissacarídeos como a celulose.

Análise dos ensaios de adsorção dos materiais

A **Figura 1** apresenta efeito da massa dos adsorventes (0,5 g e 1,0 g) na capacidade de adsorção (Q_e) e na porcentagem de remoção (%R) dos analitos pelos *biochars*. Observa-se que o processo de adsorção apresentou elevada eficiência quando empregada a massa de 1,0 g das amostras GC e GCA, para ambos os analitos.

Figura 1 – Eficiência de remoção do analito AT para GC e GCA (a) e 2,4-D para GC e GCA (b), respectivamente, em função da massa do adsorventes.



Fonte: o autor.

Em suma, as eficiências de remoção dos analitos variaram em função da massa de adsorvente empregada no processo adsorptivo. Observou-se elevada eficiência de remoção utilizando-se a dosagem de 1,0 g das amostras adsorventes. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da área superficial e do número de sítios ativos disponíveis para adsorção à medida que a dosagem de adsorvente é incrementada. No entanto, acima de uma determinada massa, o aumento da dosagem não resulta em ganhos significativos na capacidade adsorptiva, possivelmente devido à sobreposição e à interferência entre os sítios de ligação disponíveis no material adsorvente (Holanda *et al.*, 2023).

No que se refere à análise cinética do processo de adsorção dos analitos em meio aquoso, observou-se que o equilíbrio adsorptivo foi alcançado em aproximadamente 45 e 20 min para AT, e 60 e 25 min para 2,4-D, utilizando-se as amostras GC e GCA, respectivamente. Os parâmetros cinéticos obtidos a partir do ajuste dos dados experimentais aos modelos de pseudo-primeira ordem (PPO) e pseudo-segunda ordem (PSO) encontram-se apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Valores dos modelos cinéticos de adsorção dos analitos nas amostras.

Modelos cinéticos	Contaminantes	Parâmetros	Amostras	
			GC	GCA
PPO	AT	R^2	0.9964	0.9984
		Q_e (mg.g ⁻¹)	9.6218	12.3267
		k	0.126 ± 0.012	0.158 ± 0.014
	2,4-D	R^2	0.9972	0.9989
		Q_e (mg.g ⁻¹)	9.0631	10.6349
		k	0.138±0.011	0.146±0.018
PSO	AT	R^2	0.9985	0.9991
		Q_e (mg.g ⁻¹)	16.4611	22.7594
		k	0.217±0.016	0.264 ± 0.010
	2,4-D	R^2	0.9943	0.9986
		Q_e (mg.g ⁻¹)	17.8152	20.6187
		k	0.198±0.011	0.221±0.016

Verificou-se que, para ambas as amostras analisadas, o melhor ajuste dos dados experimentais foi obtido pelo modelo cinético de pseudo-segunda ordem (PSO), sugerindo que o processo adsorptivo foram predominantemente controlados por mecanismos de quimiossorção. Nessas condições, as moléculas do analito apresentaram interação com os sítios ativos da superfície adsorvente, favorecendo a adsorção em multicamadas e o deslocamento superficial das espécies adsorvidas, sem promover alterações significativas na natureza química do adsorbato (Söğüt; Gülcan, 2023).

Nos resultados, observamos que o pH influenciou o desempenho adsorptivo dos biocarvões, confirmando que a retenção de herbicidas depende tanto das características do material quanto da especificação do contaminante. Para o 2,4-D, conforme o pré-tratamento do *biochar*, obtendo maior remoção em pH próximo de 6, para ambos os *biochars*, corroborando com a literatura (Kani *et al.*, 2022). Entretanto, para a atrazina, apresentou-se menor eficiência em meio ácido e favorecimento em faixas próximo à pH 7, para ambos os *biochars*, devido a ativação química com NaOH, a qual pode alterar a área superficial, a carga da superfície e os sítios ativos disponíveis para adsorção (Salomón *et al.*, 2025).

Em relação a análise dos modelos de isotermas de adsorção do analito, nas amostras GC e GCA, a **Tabela 3** apresenta os valores dos parâmetros e os ajustes experimentais, obtidos a partir da aplicação dos modelos de isotermas de adsorção *Langmuir* e *Freundlich*.

Tabela 3 – Valores dos modelos de isotermas de adsorção dos analitos nas amostras.

Modelos de isotermas	Contaminantes	Parâmetros	Amostras	
			GC	GCA
<i>Langmuir</i>	AT	R ²	0.946	0.967
		(L/mg)	1.105	1.198
	2,4-D	R ²	0.931	0.958
		(L/mg)	1.158	1.164
<i>Freundlich</i>	AT	R ²	0.990	0.993
		(L/mg)	1.894	2.004
			0.126	0.110
	2,4-D	R ²	0.987	0.991
		(L/mg)	1.744	1.989
			0.137	0.114

Averiguou-se que, as amostras apresentaram melhor ajuste ao modelo de *Freundlich*, conforme evidenciado pelos maiores valores do coeficiente de determinação (R²). O parâmetro n do modelo de *Freundlich*, que representa a afinidade do adsorvente pelo adsorbato, apresentou valor superior para a amostra GCA em comparação com a amostra GC. De modo semelhante, a capacidade máxima de adsorção (q_{max}) estimada para GCA foi maior do que a amostra GC.

De modo semelhante, Nguyen *et al.* (2023) relataram que o *biochar* produzido a partir de casca de café e ativado com NaOH, empregado na remoção de amônio, apresentou melhor ajuste ao modelo de *Freundlich*. Resultados análogos foram observados por Lopez *et al.* (2025), ao avaliarem biocarvões derivados de casca de café para adsorção de fenol, verificando que o modelo de *Freundlich* descreveu mais adequadamente os dados de equilíbrio, em razão da elevada heterogeneidade superficial do adsorvente.

Em relação à análise termodinâmica do processo de adsorção, observou-se que, para ambos os analitos, o processo ocorreu de forma espontânea. A maior eficiência de remoção foi obtida a 25 °C, alcançando 82,1% e 84,7% para AT nas amostras GC e GCA, respectivamente, bem como 76,4% e 82,4% para 2,4-D nas mesmas amostras. Em temperaturas mais elevadas, verificou-se uma redução na capacidade de adsorção dos analitos, para ambas as amostras, indicando que o aumento da temperatura desfavoreceu o processo de adsorção. Esse comportamento pode estar associado ao estabelecimento do equilíbrio termodinâmico do sistema, tornando o processo menos eficiente em condições térmicas superiores, podendo associar-se ao enfraquecimento das forças de adsorção entre o analito e os sítios ativos do adsorvente em temperaturas mais elevadas, reduzindo a capacidade de adsorção (Zhao *et al.*, 2018).

A reciclabilidade dos materiais, foi avaliada conforme a metodologia adaptada de El Messaoudi *et al.* (2024), por meio de **cinco** ciclos sucessivos de regeneração, e adsorção por **240 min**, a **25 °C**, sob agitação constante. Em suma, verificou-se que, o material obteve

remoção dos analitos em cinco ciclos, entretanto a partir do terceiro ciclo, observou-se uma redução gradativa na eficiência, atribuída à saturação dos sítios ativos e/ou à perda de massa intrínseca resultante dos processos de lavagem e centrifugação. Dessa forma, pode-se inferir que os materiais apresentaram elevada capacidade de regeneração dos sítios ativos responsáveis pelo processo adsorptivo, mantendo desempenho satisfatório ao longo de três ciclos consecutivos de reutilização. Resultados semelhantes foram reportados por Kochito *et al.* (2024), que empregaram Fe_3O_4 suportado em *biochar* de casca de café para a remoção de glifosato em água, observando eficiência de remoção de 77,57% mesmo após seis ciclos sucessivos de reutilização do adsorvente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicaram que as amostras CG e CGA, promoveram elevada eficiência de remoção dos herbicidas AT e 2,4-D, quando empregada a massa de 1,0 g dos materiais, uma vez que ao dobrar as massas dos materiais, houve remoção proporcional. Majoritariamente, o comportamento adsorptivo dos materiais, foram adequadamente descritos pelo modelo cinético pseudo-segunda ordem (PSO) e pela isoterma de *Freundlich*, indicando que o mecanismo predominante envolve processos de quimiossorção, uma vez que nessas condições, as moléculas do analito apresentaram interação com os sítios ativos da superfície adsorvente, favorecendo a adsorção em multicamadas e o deslocamento superficial das espécies adsorvidas, sem promover alterações significativas na natureza química do adsorbato. O pH influenciou o desempenho adsorptivo dos biocarvões, de modo a confirmar que a retenção de herbicidas depende tanto das características do material quanto das propriedades físico-químicas dos analitos. O melhor ajuste experimental dos parâmetros termodinâmicos para a remoção dos analitos, foi observado na temperatura de **25 °C**, uma vez que presumivelmente pode ser atribuído ao **enfraquecimento das interações adsorptivas entre o analito e os sítios ativos do adsorvente em temperaturas mais elevadas**, o que resulta na **redução da capacidade de adsorção do sistema**. Ademais, observou-se que, os materiais mantiveram capacidade de reativação dos sítios de adsorção em cinco ciclos consecutivos, porém a partir do terceiro ciclo verificou-se redução gradativa na eficiência, atribuída à saturação dos sítios ativos e/ou à perda de massa intrínseca resultante dos processos de lavagem e centrifugação. Dessa forma, a utilização de resíduos agroindustriais como biossorventes configura-se como uma alternativa economicamente viável e ambientalmente sustentável para a remoção de contaminantes em meio aquoso, de modo a reduzir custos operacionais de tratamento, valorização de subprodutos agrícolas e a mitigação dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- AHUJA, D.; KAUSHIK, A.; SINGH, M. Simultaneous extraction of lignin and cellulose nanofibrils from waste jute bags using one pot pre-treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 107, p. 1294–1301, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.107>.
- AMÉZQUITA-MARROQUÍN, M. et al. Atrazine-induced endocrine disruption and reproductive alterations in aquatic organisms. *Environmental Research*, v. 188, p. 109611, 2020.
- BRILLAS, E. Recent development of electrochemical advanced oxidation of herbicides: a review on its application to wastewater treatment and soil remediation. *Journal of Cleaner Production*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125841>.
- CASTRO, Priscila Machado de et al. Adsorção do herbicida 2,4-D ácido 2,4-diclorofenoxyacético em carvão ativado da casca da castanha-do-brasil. *Revista Árvore*, v. 49, p. e4902, 2025.
- DOTTO, G. L.; MCKAY, G. Current scenario and challenges in adsorption for water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, n. 4, p. 103988, 2020.
- EL MESSAOUDI, Nouredine et al. Regeneration and reusability of non-conventional low-cost adsorbents to remove dyes from wastewaters in multiple consecutive adsorption–desorption cycles: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 14, n. 11, p. 11739–11756, 2024.
- HOLANDA, Marcio Anderson Silva et al. Effectiveness of *biochar* as an adsorbent for pesticides: systematic review and meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, v. 345, p. 118719, 2023.
- KANI, Alexander Nti et al. Efficient removal of 2,4-D from solution using a novel antibacterial adsorbent based on tiger nut residues: adsorption and antibacterial study. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 42, p. 64177–64191, 2022.
- KOCHITO, Jemere et al. Magnetic iron-oxide coffee husk and khat waste *biochar* nanocomposites for removal of methylene blue from aqueous solution. *Separation Science Plus*, v. 7, n. 6, p. 2300246, 2024.
- LOPEZ, Melany Alejandra Ruiz et al. Mechanisms of phenol adsorption on banana leaves and coffee husk *biochars*. *ACS Omega*, v. 10, n. 16, p. 15989–16005, 2025.
- MEILI, L. et al. Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes: experimental investigation and phenomenological modelling. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, v. 141, p. 60–71, 2019.
- MOJIRI, A. et al. Emerging pollutants in water resources: sources, fate, and treatment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 371, p. 551–565, 2019.
- NGUYEN, Tien Vinh et al. Utilizing coffee husk *biochar* as an effective adsorbent for ammo-

nium removal in groundwater. *Engineering and Technology for Sustainable Development*, v. 33, n. 5, p. 26–33, 2023.

SALOMÓN, Yamil L. et al. A comprehensive review on atrazine adsorption: from environmental contamination to efficient removal technologies. *Sustainability*, v. 17, n. 23, p. 10455, 2025.

SALEH, I.; ZOUARI, N.; AL-GHOUTI, M. Removal of pesticides from water and wastewater: chemical, physical and biological treatment approaches. *Environmental Technology and Innovation*, v. 19, p. 101026, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101026>.

SÖĞÜT, Eda Gökırmak; GÜLCAN, Mehmet. Adsorption: basics, properties, and classification. In: *Adsorption through advanced nanoscale materials*. Elsevier, 2023. p. 3–21.

ZHAO, Lulu et al. Characterization of modified *biochars* prepared at low pyrolysis temperature as an efficient adsorbent for atrazine removal. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, n. 2, p. 1405–1417, 2018.

ZHOU, Jian et al. Highly selective and efficient removal of fluoride from ground water by layered Al-Zr-La tri-metal hydroxide. *Applied Surface Science*, v. 435, p. 920–927, 2018.