Dataset Reports 2:1 (2023)
ISSN 2965-1182

REVIEW ARTICLE

DATASET REPORTS

Use of organic waste for the production of adsorbents

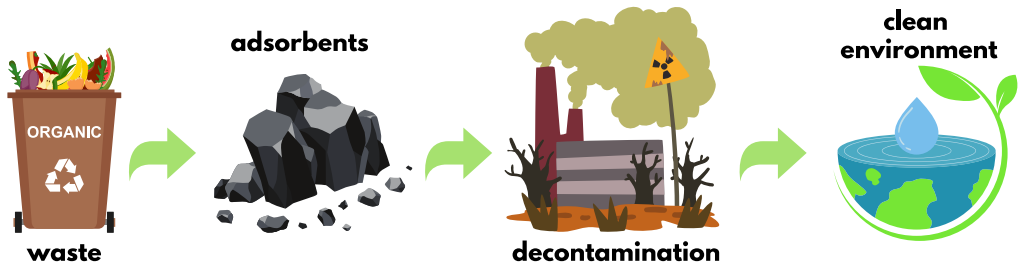
Eduarda Medran Rangel [a,b*], Adrize Medran Rangel [a,b], Fernando Machado Machado [a,b,c]

[a] Laboratório de Pesquisa em Materiais – LAPEM, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 96010-610, RS, Brasil.
[b] Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 96010-020, RS, Brasil.
[c] Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 96010-610, RS, Brasil.

Abstract
Agro-industrial production generates a large amount of waste, which is often indirectly discarded. Activated carbon is widely recognized as an excellent adsorbent for the decontamination of water and effluents. This material can be produced using agro-industrial biomass as raw materials. In this context, shrimp and rice shells have emerged as attractive biomass for the production of adsorbents. This brief review aims to evaluate studies conducted using agro-industrial residues for the production of adsorbents and their application in removing environmental contaminants from contaminated water. The research was conducted using the databases Portal de Periódicos Capes, Scientific Electronic Library Online - SciElo, Science Direct, and Google Scholar. A total of 12 articles were analyzed. The studies demonstrate that adsorbent materials derived from agro-industrial waste efficiently remove dyes, drugs, metals, and other contaminating compounds. All materials surveyed in this research exhibited high efficiency in removing target contaminants. These raw materials are not only inexpensive and readily available but also possess adsorption properties comparable to commercial materials.

Keywords: Activated carbon, agroindustrial waste, food waste, industry waste.

Graphical Abstract



*Corresponding author: Eduarda M. Rangel. E-mail address: eduardamrangel@gmail.com
Received: May 29, 2023; Accepted: Jul 03, 2023; Published: Jul 03, 2023
© The Author(s) 2023. Open Access (CC BY 4.0).

ROYALDATASET

1. Introdução

Alterações ambientais decorrentes do aumento da população em escala global causam sobrecarga nos compartimentos ambientais (água, ar, sedimento e solo). Vários são os contaminantes que estão presentes na natureza e dentre eles podemos citar os metais pesados, fármacos, corantes, organoclorados e defensivos agrícolas. Estima-se que mais de 10 milhões de ambientes receptivos estejam poluídos em escala global e mais de 50% desses ambientes sejam danificados por metais pesados ou metaloides (He et al., 2019). Para a remoção de compostos químicos não desejáveis em águas contaminadas são utilizadas várias técnicas, tais como adsorção, nanofiltração, processo de precipitação induzida por reticulação, fotodegradação, processo de remoção físico-química, osmose reversa, precipitação e ultrafiltração (Hidalgo-Ulloa, Buisman & Weijma 2022; Karthi et al., 2022; Kharrazi et al., 2020; Rutten et al., 2023). Muitos materiais orgânicos, inorgânicos ou uma combinação de ambos os materiais são desenvolvidos para produzir processos de adsorção de alta energia (Karnib et al., 2014). O carvão ativado é geralmente utilizado como adsorvente de poluentes como metais pesados (Prajapati Das & Mondal, 2020) e corantes (Tang & Zaini, 2020). O carvão ativado tem como característica uma boa afinidade de adsorção com diferentes analitos (Kharrazi et al., 2020).

Devido ao alto custo das matérias-primas, a aplicação em larga escala de carvão ativado no tratamento de águas pode ser cara. Recentemente, biomassas e resíduos orgânicos, como aqueles advindos de indústrias de alimentos e agroindústrias, são considerados alternativas interessantes para produção de carvão ativado (ou biocarvão, do inglês *biochars*) devido ao baixo custo e ampla disponibilidade (Qu et al., 2016). Vários materiais de biomassa como casca de coco, cavacos de madeira, espigas de milho e palha têm sido usados para preparar adsorventes, como o carvão ativado (Lei et al., 2022, Tang et al., 2021).

Várias fontes de carbono têm sido relatadas como ingredientes básicos do carvão ativado, elas incluem biomassa dura, como madeira de olmo com teor de celulose, onde os resultados da análise do teor de elemento C atingem 47,5% (em peso) (Kharrazi et al., 2020), *Bambusa vulgaris* Striata com teor de lignocelulose de 70,4%, onde o elemento C chega a 45% (Mistar et al., 2020) e casca de coco (Liang et al., 2020). Além destes, destacam-se resíduos agrícolas (resíduos de frutos, produtos hortícolas e sementes) tais como casca de frutos kawista (casca de *Limonia acidissima*) com um teor de carbono até 49,6% (Das & Mishra, 2020), casca de arroz com um teor de carbono até 37,30%, folhas de *Platanus orientalis* com teor de carbono de 45,23% (Jiang et al., 2020), batatas (Kyzas, Deliyanni & Matis, 2016; Lv et al., 2020), cenouras e tomates (Changmai et al., 2018), gramíneas (Tu et al., 2020), biomassa marinha como as espécies de algas *Ulva lactuca* e *Systoceira stricta* do Mediterrâneo e resíduos industriais, como microalgas remanescentes da indústria de ágar (Ferrera-Lorenzo et al., 2014).

A casca de arroz como um dos maiores resíduos de biomassa é um ótimo recurso para a produção de materiais carbonáceos e siliciosos renováveis. Já a casca do camarão é rica em cálcio, proteína e como fonte de carbono, pode produzir biocarvão com cálcio e nitrogênio residuais (Long et al., 2017; Xiao et al., 2017).

O objetivo desta pesquisa é apresentar um compilado de estudos existentes na literatura que abordem o uso de resíduos agroindustriais com foco em cascas de arroz e de camarão, para a produção de adsorventes e sua aplicação na remoção de compostos químicos indesejáveis e tóxicos (contaminantes) em águas contaminadas.

2. Material e Métodos

Esta revisão da literatura foi desenvolvida a partir da avaliação de artigos publicados no período de 2013 até maio de 2023, localizados nas bases eletrônicas: Portal de Periódicos Capes, Scientific Electronic Library Online - SciELO, Science Direct e Google Acadêmico. Foram empregados os descritores: “casca de arroz+adsorvente”, “adsorvente+orgânico”, “adsorvente+casca de camarão”, “adsorvente+compostos emergentes”, e seus respectivos sinônimos, nos idiomas português e inglês. Foram incluídos apenas artigos que tratassem do tema e estivessem disponíveis na forma online. Foram excluídos artigos fora do período proposto, que não tratassem sobre o tema, não disponíveis de forma online e artigos repetidos encontrados em diferentes bases de dados. No total foram analisados 12 artigos, estes tratando exatamente do tema desta pesquisa. A **Fig. 1** apresenta a estratégia de busca e inclusão dos artigos selecionados nesta pesquisa. Em laranja apresenta-se o fluxograma para seleção

de artigos que utilizam a casca de arroz, e em cinza, para a casca de camarão.

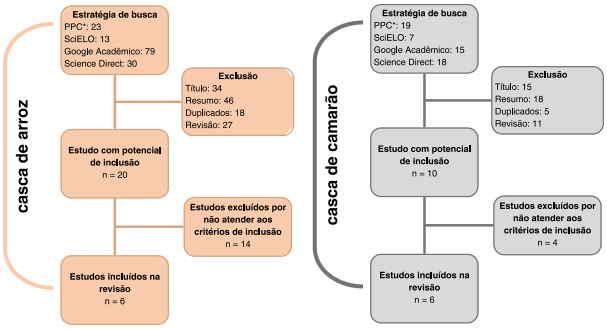


Fig. 1 Fluxograma de estratégia para a pesquisa de revisão bibliográfica nas bases de dados Portal de Periódicos Capes (PPC*) Scientific Electronic Library Online (SciELO), Google Acadêmico, e Science Direct.

3. Resultados e Discussão

A casca de arroz é um resíduo agroindustrial gerado em grande quantidade. De acordo com a plataforma Statista (2023), o volume total estimado de arroz beneficiado produzido em todo o mundo atingiu mais de 502 milhões de toneladas na safra 2022/2023. Subproduto do beneficiamento do arroz, a casca é um material rico em sílica, utilizado para diversos fins, entre eles a produção de adsorventes para a remoção de contaminantes em águas e efluentes. As nanopartículas de sílica agregam-se na superfície da casca de arroz e nas camadas intercelulares das paredes celulares, que fornecem à casca de arroz uma estrutura auto modelada única para a fabricação de carvão ativado poroso hierárquico por meio do processo de carbonização e ativação (Fu et al., 2019).

A **Tabela 1** apresenta uma síntese dos artigos analisados nesta pesquisa que utilizaram casca de arroz como adsorvente para a remoção de contaminantes em águas e/ou efluentes, apresentando os autores, o contaminante alvo, como utilizaram a casca de arroz e a eficiência do processo.

Tabela 1 Síntese dos artigos analisados utilizando casca de arroz como adsorvente.

Contaminante	Modo de utilização	Eficiência	Referência
Cu(II)	Casca de arroz tratada	88,9% de remoção	Zhang et al. (2014)
Tetraciclina	Casca de arroz	83,52% de remoção	Chen et al. (2016)
CO_2	Zeólitas	-	Wang et al. (2018)
Pb(II) e Cd(II)	Biocarvão magnético de casca de arroz	95% de remoção	Sun et al. (2019)
Azul de metileno	Esferas magnéticas de alginato/casca de arroz	90% de remoção	Alver, Metin & Brouers (2020)
Escherichia coli	Biocarvão de casca de arroz com fósforo vermelho	100% de remoção	Liu et al. (2023)

O uso de adsorvente à base de casca de arroz para adsorção de Cu(II) foi o objeto de pesquisa de Zhang et al. (2014). Modificações químicas por tratamento da casca de arroz com H_3PO_4 aumentaram a capacidade de adsorção da casca de arroz para Cu(II). A quantidade máxima de adsorção foi de 17,0358 $mg.g^{-1}$ em uma dosagem de 2 $g.L^{-1}$ após 180 min. Os resultados mostraram que o pH ótimo foi alcançado em pH 4,0. A porcentagem de remoção de Cu(II) aproximou-se do equilíbrio em 180 min com 88,9% de remoção.

A adsorção de tetraciclina em cinza de casca de arroz (RCA) foi alvo de estudo de Chen et al. (2016). O estudo visou explorar a viabilidade do resíduo de casca de arroz como um novo adsorvente e entender seu mecanismo de adsorção para tetraciclina (TC). Também foram avaliadas as influências da concentração inicial de TC, tempo de adsorção, pH da solução e temperatura no desempenho de adsorção de RCA. Verificou-se que a eficiência de remoção de TC de RCA está relacionada com a concentração inicial da solução de TC. A concentração de TC diminui acentuadamente nos primeiros 60 min em seu processo de adsorção e então apenas gradualmente, atingindo o equilíbrio dentro de 600 min. A capacidade de adsorção de RCA está relacionada ao pH da solução, temperatura e intensidade de íons, especialmente em um valor de pH alto. Um aumento na temperatura fez com que a capacidade de adsorção mais do que dobrasse. Além disso, soluções de baixa acidez e alta alcalinidade podem acelerar a adsorção de TC em RCA. Tais descobertas podem servir como um guia útil para expandir a aplicabilidade da RCA para novas áreas.

Zeólitas foram preparadas por Wang et al. (2018), usando sílica extraída de cinzas de casca de arroz como matéria-prima e foram investigadas quanto ao desempenho de adsorção de CO_2 como adsorvente para resolver o problema de suprimir o aquecimento global. A seletividade CO_2/N_2 e as

constantes da lei de Henry foram calculadas para demonstrar que as amostras têm maior afinidade pelo CO_2, especialmente em baixas pressões, houve adsorção de CO_2 e N_2 nas três zeólitas, o que indicou que elas apresentavam excelente potencial de adsorção e separação de CO_2 em gases de combustão industriais .

A adsorção de Pb(II) e Cd(II) utilizando biocarvão magnético de casca de arroz foi a pesquisa de Sun et al. (2019). Os resultados mostraram que a quantidade máxima de adsorção foi mantida acima de 95% quando o valor de pH foi maior que 2,5 e 3,5 para Pb(II) e Cd(II), respectivamente. Os desempenhos de adsorção de ambos os metais pesados foram pouco influenciados pela força iônica. As capacidades de adsorção puderam se manter acima de 50% e 87% após quatro ciclos para Pb(II) e Cd(II), respectivamente. Este trabalho propôs um novo método para fabricar um biocarvão magnético com alta capacidade de adsorção dos metais pesados Pb(II) e Cd(II).

Alver, Metin e Brouers (2020) desenvolveram esferas magnéticas de alginato/casca de arroz (m-ALG/RH) biocompostas preparadas pelo método de gelificação ionotrópica e utilizadas para remoção de azul de metileno. A produção de grânulos magnéticos de alginato/casca de arroz como adsorvente para a remoção de azul de metileno foi investigada a partir de solução aquosa. Foi determinado que o pH não tem efeito significativo na eficiência de remoção de corante das esferas, enquanto a temperatura e a força iônica causaram uma diminuição na eficiência de remoção. Os cálculos termodinâmicos indicaram que a adsorção do azul de metileno foi de natureza espontânea e exotérmica. Os resultados mostraram que o biocompósito magnético de alginato/casca de arroz como adsorvente de baixo custo e ecologicamente correto pode ser efetivamente usado para etapas de remoção de corantes catiônicos em aplicações de engenharia ambiental, chegando a quase 90% de remoção.

O desenvolvimento compósito não metálico, biocarvão de casca de arroz carregados com fósforo vermelho, para remoção *Escherichia coli* foi o estudo de Liu et.al (2023). Os autores obtiveram 100% de remoção dentro de 2 h sob luz visível. Além disso, o material também apresentou excelente estabilidade e reutilização, mesmo após 9 ciclos de esterilização, o efeito ainda permaneceu 100%.

Cerca de 93 bilhões de toneladas de crustáceos compostos por camarões e lagostas são produzidos globalmente por ano (Mathew et al., 2020). O procedimento de pirólise com casca de camarão tem sido aplicado para reduzir o volume e a massa de materiais de biomassa e, simultaneamente, produzir biocarvão, um material adsorvente (Dai et al., 2021; Hamid et al., 2022). Beneficiando-se de excelentes propriedades físico-químicas, como grande área superficial específica e abundantes grupos funcionais contendo oxigênio, o biocarvão tem sido amplamente utilizado em aplicações como remediação de solo, tratamento de águas residuárias e sequestro de carbono (Ji et al., 2023; Li et al., 2022).

A **Tabela 2** apresenta uma síntese dos artigos analisados nesta pesquisa que utilizaram casca de camarão como adsorvente para a remoção de contaminantes em águas e/ou efluentes, apresentando os autores, o contaminante alvo, como utilizaram a casca de camarão e a eficiência do processo.

Tabela 2 Síntese dos artigos analisados utilizando casca de camarão como adsorvente.

Contaminante	Modo de utilização	Eficiência	Referência
Cr(VI)	Nanopartículas de Fe_3O_4 com quitina extraída do camarão	75-88% de remoção	Pourmortazavi et al. (2019)
Metribuzina, prometrina e terbutilazina	Quitosana-calcita	Metribuzina 84% de remoção Prometrina 81% de remoção Terbutilazina 76% de remoção	Borja-Urzola et al. (2021)
Cu(II) e Pb(II)	Resíduo de casca de camarão tratado (RCCT)	Cu (II) 96,42% de remoção Pb(II) 89,77% de remoção	Boddu, Chandra & Ali Khan (2022)
Azul de metileno	Quitina naturalmente disponível em casca de camarão	95% de remoção	Karthi et al. (2022)
Tris (2-cloroetil) fosfato	Biocarvão rico em cálcio derivado de casca de camarão	95% de remoção	Yang et al. (2023)
Azul de metileno	Microesferas magnéticas de quitosana (MC)	81% de remoção	Rahmi et al. (2023)

A casca de camarão é rica em cálcio e a presença deste no biocarvão pode fornecer sítios mais ativos para a adsorção de poluentes orgânicos de acordo com a literatura (Dai et al., 2017; Dai et al., 2018). Assim, a utilização de resíduos de casca de camarão como fonte de biocarvão com potencial de aplicação no tratamento de água poderia ser uma

estratégia para reciclagem de recursos e proteção ambiental.

No trabalho de Pourmortazavi et al. (2019), nanopartículas de Fe_3O_4 foram biosintetizadas pelo método de coprecipitação na presença de quitosana e tripolifosfato extraídos de camarão. A aplicação das nanopartículas de Fe_3O_4 foi então avaliada na extração e remoção Cr(VI) em amostras de água. Os parâmetros efetivos como pH, tempo de contato, dosagem de adsorvente e velocidade de agitação foram otimizados pelo método de planejamento do experimento e investigados pela metodologia de superfície de resposta. Com base nos resultados, 75-88% de Cr(VI) pode ser removido das amostras reais, indicando a alta eficiência de remoção de cromato dos adsorventes sintéticos.

Na investigação de Borja-Urzola et al. (2021), foi estudada a aplicação de um adsorvente à base de resíduos de camarão para a remoção de metribuzina, prometrina e terbutilazina de meios aquosos. Estudos de adsorção confirmaram que a quitosana-calcita foi capaz de interagir com metribuzina, prometrina e terbutilazina principalmente através da formação de pontes de hidrogênio, interações hidrofóbicas e interações dipolo-dipolo. O processo de adsorção foi afetado pela concentração inicial das triazinas e pelo pH do meio. Ao contrário de outros processos, devido às propriedades químicas das triazinas estudadas, as forças eletrostáticas diminuíram a capacidade de adsorção gerando repulsões de carga entre ambos os compostos em pH abaixo de 5 e acima de 9. Assim, em pH 7, a neutralidade favoreceu o processo de adsorção. Os estudos de adsorção em leito fixo mostraram que a quitosana-calcita apresentou permeabilidade. Os resultados indicaram que a quitosana-calcita possui uma capacidade de adsorção considerável, pelo que se pode afirmar que a quitosana-calcita pode ser um adsorvente eficiente e de baixo custo para a remoção de metribuzina, prometrina e terbutilazina de solução aquosa.

Boddu, Chandra e Ali Khan (2022) analisaram a aplicação de resíduo de casca de camarão tratado (RCCT) como um potencial bioadsorvente na remoção de Cu(II) e Pb(II) de efluentes industriais perigosos. Os efeitos do pH (1–10), dependência do tempo (1–60 min), concentração inicial de Cu(II) e Pb(II) (20–100 mg L^{-1}) e temperatura (29,85 - 59,85 ºC) na eficiência de biossorção usando o bioadsorvente foram examinados através de experimentos. As descobertas experimentais indicaram que a eficiência máxima de bioadsorção foi de 96,42% em pH 5, 40 min para Cu(II) e 89,77% em pH 6, 30min para Pb(II), 20 mg.L^{-1} de concentração, com uma carga de 0,1 g e temperatura de 29,85 ºC. Assim, este estudo revelou que RCCT tem um grande potencial para ser um biossorvente ecologicamente correto e econômico para remoção de Cu(II) e Pb(II) contendo efluentes industriais.

No estudo de Karthi et al. (2022) foi removido o corante azul de metileno presente no efluente usando quitina naturalmente disponível em casca de camarão. A alcalinidade do efluente reduz a porcentagem de remoção de corante e o estudo experimental afirma que 0,5 g de quitina remove 95% do corante azul de metileno com pH de 7. A capacidade da quitina para remover o corante azul de metileno foi explicada.

O trabalho de Yang et al. (2023) aplicou um biocarvão rico em cálcio derivado de casca de camarão como adsorvente de baixo custo para remoção de tris (2-cloroetil) fosfato (TCEP). O biocarvão preparado demonstrou capacidade de remoção de TCEP estável em uma ampla faixa de pH, na presença de ânions coexistentes e em diversos corpos d'água. Quando a dosagem de biocarvão foi de 0,2 g.L^{-1}, 95% do TCEP foi removido nos primeiros 30 min. A análise do mecanismo indicou que as espécies de cálcio e os grupos funcionais básicos na superfície do biocarvão estavam altamente envolvidos no processo de adsorção do TCEP.

O desenvolvimento de microesferas magnéticas de quitosana (MC) com enriquecimento de grupo funcional usando diglicidil éter de polietilenoglicol (PEGDE) e ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) para remover azul de metileno aquoso foi a pesquisa de Rahmi et al. (2023). A capacidade de adsorção do azul de metileno nas MC aumentou em até 37,62% após a adição de EDTA. Os parâmetros de adsorção ótimos registrados neste estudo foram no tempo de 30 minutos de contato e pH de 10. Em tais condições ótimas, a capacidade de adsorção e a porcentagem de remoção atingiram 5,04±0,03 mg.g^{-1}, 80,64±0,12%, respectivamente. Em conclusão, o adsorvente preparado pelos autores a partir de materiais e métodos verdes pode efetivamente remover o azul de metileno do meio aquoso.

Todas as pesquisas aqui relatadas têm ótimos resultados utilizando a casca de arroz e a casca de camarão como base e/ou adsorventes na remoção de diversos contaminantes. Os resultados

de pesquisas utilizando casca de arroz para remoção de corante (90% de remoção) (Alver, Metin & Brouers, 2020) são muito próximos a testes com o carvão ativado comercial que chegam a 95% de remoção de corantes (Keshmiri-Naqab & Taghavijeloudar, 2023).

Outros adsorventes a partir de biomassa para remoção de corantes, por exemplo, também estão na literatura e os resultados são semelhantes aos encontrados utilizando as biomassas alvo desta pesquisa. A utilização de *Fucus vesiculosus*, a alga marrom que foi utilizada como bioadsorvente para eliminação de corantes catiônicos de solução aquosa por Yadav, Thakore e Jadeja (2022). A eficiência de remoção do bioadsorvente de algas marinhas *F. vesiculosus* foi de 98,71% para azul de metileno e 96,68% para Rodamina B.

Já na remoção de metais, além da casca de arroz e a de camarão podemos citar como adsorvente oriundos de biomassa a borra de café, onde Nilamsari et al. (2022) obtiveram resultados similares aos citados anteriormente. Os autores alcançaram remoção de 92,32% e 97,05% para Fe e Pb, respectivamente, em condições ótimas.

Todos os dados apresentados corroboram com a possibilidade de aproveitamento de biomassas agroindustriais na adsorção de contaminantes em águas e efluentes, seja na forma *in natura*, ou modificada.

4. Conclusão

O consumo acelerado gera uma grande quantidade de resíduos sólidos em todo o mundo, sendo necessário e urgente alternativas que minimizem o impacto que o descarte incorreto destes materiais pode causar no meio ambiente. Os resíduos agroindustriais ganham destaque, pois o setor alimentício não para de funcionar nunca e gera grande quantidade de material, muitos com diversas características que podem ser aproveitadas no reuso, seja no próprio processo ou para a produção de novos materiais como no caso dos adsorventes.

Os adsorventes compostos de biomassa residuária de processos agroindustriais, são atóxicos, econômicos e facilmente acessíveis, pois estão disponíveis em abundância e de forma barata. A literatura indica que as cascas de arroz e de camarão utilizadas como base para a produção de adsorventes apresentam vantagens econômicas e ecológicas. Diversos tipos de contaminantes (*e.g.,* metais pesados, corantes, fármacos, e compostos orgânicos) podem ser removidos com eficiência utilizando os adsorventes em questão, em todas as pesquisas apresentadas neste artigo a remoção do contaminante alvo foi maior que 70%, mostrando que é possível reutilizar, reaproveitar e minimizar os problemas ambientais utilizando materiais orgânicos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pelo apoio financeiro e bolsas de estudos. Os autores também agradecem a FAPERGS ao apoio financeiro.

Contribuições dos Autores

E.M.R - Redação -preparação do rascunho original; Pesquisa; Redação; Revisão. A.M.R - Redação - preparação do rascunho original; Pesquisa; Redação; Revisão. F.M.M.- Supervisão; Redação; Revisão. Todos os autores leram e aprovaram o manuscrito final.

Disponibilidade de dados e materiais

Não aplicável.

Interesses concorrentes

Os autores declaram que não têm interesses conflitantes.

Referências

Alver, E., Metin, A. Ü., & Brouers, F. (2020). Methylene blue adsorption on magnetic alginate/rice husk bio-composite. *International Journal of Biological Macromolecules*, *154*, 104–113. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.330

Boddu, S., Chandra, A., & Ali Khan, A. (2022). Biosorption of Cu(II), Pb(II) from electroplating industry effluents by treated shrimp shell. *Materials Today: Proceedings*, *57*, 1520–1527. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.052

Borja-Urzola, A. del C., García-Gómez, R. S., Bernal-González, M., & Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. del C. (2021). Chitosan-calcite from shrimp residues: A low-cost adsorbent for three triazines removal from aqueous media. *Materials Today Communications*, *26*, 102131. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102131

Changmai, M., Banerjee, P., Nahar, K., & Purkait, M. K. (2018). A novel adsorbent from carrot, tomato and polyethylene terephthalate waste as a potential adsorbent for Co (II) from aqueous solution: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *6*(1), 246–257. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.009

Chen, Y., Wang, F., Duan, L., Yang, H., & Gao, J. (2016). Tetracycline adsorption onto rice husk ash, an agricultural waste: Its kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Molecular Liquids*, *222*, 487–494. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.07.090

Dai, L., Lu, Q., Zhou, H., Shen, F., Liu, Z., Zhu, W., & Huang, H. (2021). Tuning oxygenated functional groups on biochar for water pollution control: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, *420*, 126547. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126547

Dai, L., Tan, F., Li, H., Zhu, N., He, M., Zhu, Q., Hu, G., Wang, L., & Zhao, J. (2017). Calcium-rich biochar from the pyrolysis of crab shell for phosphorus

removal. *Journal of Environmental Management*, *198*, 70–74. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.057

Dai, L., Zhu, W., He, L., Tan, F., Zhu, N., Zhou, Q., He, M., & Hu, G. (2018). Calcium-rich biochar from crab shell: An unexpected super adsorbent for dye removal. *Bioresource Technology*, *267*, 510–516. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.090

Das, S., & Mishra, S. (2020). Insight into the isotherm modelling, kinetic and thermodynamic exploration of iron adsorption from aqueous media by activated carbon developed from *Limonia acidissima* shell. *Materials Chemistry and Physics*, *245*, 122751. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122751

Ferrera-Lorenzo, N., Fuente, E., Suárez-Ruiz, I., & Ruiz, B. (2014). KOH activated carbon from conventional and microwave heating system of a macroalgae waste from the Agar-Agar industry. *Fuel Processing Technology*, *121*, 25–31. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.12.017

Hamid, Y., Liu, L., Usman, M., Naidu, R., Haris, M., Lin, Q., Ulhassan, Z., Hussain, M. I., & Yang, X. (2022). Functionalized biochars: Synthesis, characterization, and applications for removing trace elements from water. *Journal of Hazardous Materials*, *437*, 129337. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129337

He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P. C., & Xu, J. (2019). Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. *Environmental Pollution*, *252*, 846–855. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.151

Hidalgo-Ulloa, A., Buisman, C., & Weijma, J. (2022). Metal sulfide precipitation mediated by an elemental sulfur-reducing thermoacidophilic microbial culture from a full-scale anaerobic reactor. *Hydrometallurgy*, *213*, 105950. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105950

Ji, C., Yang, S., Cheng, Y., Liu, L., Wang, D., Zhu, S., E, T., & Li, Y. (2023). *In situ* formed CaSO4 on waste dander biochar to inhibit the mineralization of soil organic carbon. *Science of the Total Environment*, *854*, 158776. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158776

Jiang, X., Sun, P., Xu, L., Xue, Y., Zhang, H., & Zhu, W. (2020). *Platanus orientalis* leaves based hierarchical porous carbon microspheres as high efficiency adsorbents for organic dyes removal. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *28*(1), 254–265. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.03.030

Karnib, M., Kabbani, A., Holail, H., & Olama, Z. (2014). Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite. *Energy Procedia*, *50*, 113–120. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.014

Karthi, S., Sangeetha, R. K., Arumugam, K., Karthika, T., & Vimala, S. (2022). Removal of methylene blue dye using shrimp shell chitin from industrial effluents. *Materials Today: Proceedings*, *66*, 1945–1950. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.428

Keshmiri-Naqab, R., & Taghavijeloudar, M. (2023). Could organoclay be used as a promising natural adsorbent for efficient and cost-effective dye wastewater treatment? *Journal of Environmental Management*, *342*, 118322. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118322

Kharrazi, S. M., Mirghaffari, N., Dastgerdi, M. M., & Soleimani, M. (2020). A novel post-modification of powdered activated carbon prepared from lignocellulosic waste through thermal tension treatment to enhance the porosity and heavy metals adsorption. *Powder Technology*, *366*, 358–368. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.065

Kyzas, G. Z., Deliyanni, E. A., & Matis, K. A. (2016). Activated carbons produced by pyrolysis of waste potato peels: Cobalt ions removal by adsorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *490*, 74–83. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.11.038

Lei, Y., Guo, X., Jiang, M., Sun, W., He, H., Chen, Y., Thummavichai, K., Ola, O., Zhu, Y., & Wang, N. (2022). Co-ZIF reinforced cow manure biochar (CMB) as an effective peroxymonosulfate activator for degradation of carbamazepine. *Applied Catalysis B: Environmental*, *319*, 121932. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121932

Li, N., He, M., Lu, X., Yan, B., Duan, X., Chen, G., Wang, S., & Hou, L. (2022). Municipal solid waste derived biochars for wastewater treatment: Production, properties and applications. *Resources, Conservation and Recycling*, *177*, 106003. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106003

Liang, Q., Liu, Y., Chen, M., Ma, L., Yang, B., Li, L., & Liu, Q. (2020). Optimized preparation of activated carbon from coconut shell and municipal sludge. *Materials Chemistry and Physics*, *241*, 122327. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122327

Liu, M., Guan, L., Wen, Y., Su, L., Hu, Z., Peng, Z., Li, S., Tang, Q., Zhou, Z., & Zhou, N. (2023). Rice husk biochar mediated red phosphorus for photocatalysis and photothermal removal of *E. coli*. *Food Chemistry*, *410*, 135455. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135455

Long, L., Xue, Y., Zeng, Y., Yang, K., & Lin, C. (2017). Synthesis, characterization and mechanism analysis of modified crayfish shell biochar possessed ZnO nanoparticles to remove trichloroacetic acid. *Journal of Cleaner Production*, *166*, 1244–1252. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.122

Lv, S., Li, C., Mi, J., & Meng, H. (2020). A functional activated carbon for efficient adsorption of phenol derived from pyrolysis of rice husk, KOH-activation and EDTA-4Na-modification. *Applied Surface Science*, *510*, 145425. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145425

Mathew, G. M., Mathew, D. C., Sukumaran, R. K., Sindhu, R., Huang, C. C., Binod, P., Sirohi, R., Kim, S. H., & Pandey, A. (2020). Sustainable and eco-friendly strategies for shrimp shell valorization. *Environmental Pollution*, *267*, 115656. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115656

Mistar, E. M., Alfatah, T., & Supardan, M. D. (2020). Synthesis and characterization of activated carbon from Bambusa vulgaris striata using two-step KOH activation. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(3), 6278–6286. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.041

Nilamsari, Sofyana, Lubis, M. R., Prilyanti, D., & Maimun, T. (2022). Combination of adsorption process using bioadsorbent from coffee ground and ultrafiltration membrane in removing iron and lead content from water. *Materials Today: Proceedings*, *63*, S115–S121. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.051

Pourmortazavi, S. M., Sahebi, H., Zandavar, H., & Mirsadeghi, S. (2019). Fabrication of Fe3O4 nanoparticles coated by extracted shrimp peels chitosan as sustainable adsorbents for removal of chromium contaminates from wastewater: The design of experiment. *Composites Part B: Engineering*, *175*, 107130. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107130

Prajapati, A. K., Das, S., & Mondal, M. K. (2020). Exhaustive studies on toxic Cr(VI) removal mechanism from aqueous solution using activated carbon of *Aloe vera* waste leaves. *Journal of Molecular Liquids*, *307*, 112956. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112956

Qu, J., Lv, S., Peng, X., Tian, S., Wang, J., & Gao, F. (2016). Nitrogen-doped porous "green carbon" derived from shrimp shell: Combined effects of pore sizes and nitrogen doping on the performance of lithium sulfur battery. *Journal of Alloys and Compounds*, *671*, 17–23. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.064

Rahmi, R., Lelifajri, L., Fathurrahmi, F., Fathana, H., & Iqhrammullah, M. (2023). Preparation and characterization of PEGDE-EDTA-modified magnetic chitosan microsphere as an eco-friendly adsorbent for methylene blue removal. *South African Journal of Chemical Engineering*, *43*, 296–302. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.11.009

Rutten, S. B., Levering, V. L., Hernández Leal, L., de Grooth, J., & Roesink, H. D. W. (2023). Retention of micropollutants by polyelectrolyte multilayer based hollow fiber nanofiltration membranes under fouled conditions. *Journal of Water Process Engineering*, *53*, 103760. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103760

Statista. (2023). *Leading countries based on the production of milled rice in 2021/2022*. Acesso em: 26 jun. 2023. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/255945/top-countries-of-destination-for-us-rice-exports-2011/.

Sun, C., Chen, T., Huang, Q., Wang, J., Lu, S., & Yan, J. (2019). Enhanced adsorption for Pb(II) and Cd(II) of magnetic rice husk biochar by KMnO4 modification. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(9), 8902–8913. https://doi.org/10.1007/s11356-019-04321-z

Tang, S. H., & Zaini, M. A. A. (2020). Development of activated carbon pellets using a facile low-cost binder for effective malachite green dye removal. *Journal of Cleaner Production*, *253*, 119970. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119970

Tang, X., Ran, G., Li, J., Zhang, Z., & Xiang, C. (2021). Extremely efficient and rapidly adsorb methylene blue using porous adsorbent prepared from waste paper: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, *402*, 123579. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123579

Tu, B., Wen, R., Wang, K., Cheng, Y., Deng, Y., Cao, W., Zhang, K., & Tao, H. (2020). Efficient removal of aqueous hexavalent chromium by activated carbon derived from Bermuda grass. *Journal of Colloid and Interface Science*, *560*, 649–658. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.10.103

Wang, Y., Du, T., Jia, H., Qiu, Z., & Song, Y. (2018). Synthesis, characterization and CO2 adsorption of NaA, NaX and NaZSM-5 from rice husk ash. *Solid State Sciences*, *86*, 24–33. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2018.10.003

Xiao, Y., Xue, Y., Gao, F., & Mosa, A. (2017). Sorption of heavy metal ions onto crayfish shell biochar: Effect of pyrolysis temperature, pH and ionic strength. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *80*, 114–121. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.08.035

Yadav, M., Thakore, S., & Jadeja, R. (2022). Removal of organic dyes using *Fucus vesiculosus* seaweed bioadsorbent an ecofriendly approach: Equilibrium, kinetics and thermodynamic studies. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, *4*, 67–77. https://doi.org/10.1016/j.enceco.2021.12.003

Yang, C., Liu, C., Yan, Y., Lu, L., Ma, R., Xiao, X., Yu, Y., Zhao, Y., Yu, Y., & Li, L. (2023). Efficient removal of Tris(2-chloroethyl) phosphate by biochar derived from shrimp shell: Adsorption performance and mechanism study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *254*, 114728. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114728

Zhang, Y., Zheng, R., Zhao, J., Ma, F., Zhang, Y., & Meng, Q. (2014). Characterization of H3PO4-treated rice husk adsorbent and adsorption of copper(II) from aqueous solution. *BioMed Research International*, *2014*, 1–8. https://doi.org/10.1155/2014/496878