COCO E *Sargassum* NA ADSORÇÃO DE METAIS: PANORAMA BIBLIOMÉTRICO DE BIOMASSAS TERRESTRE E MARINHA

Autores: Elcy Disneth Serna Copete, Lucimara Ribeiro Venial, Poliany de Oliveira Barbosa, Pedro Henrique Fischer Ferreira, Barbara Lima Sartorio, Maria de Fatima Pereira dos Santos, Maristela de Araujo Vicente.

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro Universitário do Norte do Espírito Santo (CEUNES), Rodovia Governador Mário Covas, Km 60, Bairro Litorâneo - 29932-540 São Mateus - ES, Brasil, elcy.copete@edu.ufes.br

Resumo

A contaminação de matrizes aquosas por metais demanda alternativas de tratamento que conciliem eficiência ambiental, valorização de resíduos e sustentabilidade. Este estudo objetivou analisar a evolução e as características da produção científica sobre materiais derivados de coco e *Sargassum* empregados na adsorção de metais em água, identificando tendências, aplicações e lacunas. Realizou-se uma revisão de literatura com análise bibliométrica e triagem estruturada de registros provenientes da Scopus e Web of Science. Foram selecionados estudos que apresentaram metais como alvo de adsorção ou biossorção, utilizaram coco ou *Sargassum* como adsorvente e envolveram matrizes aquosas. Dos 1.757 registros consolidados, 612 foram incluídos, sendo 429 relacionados ao coco e 183 a *Sargassum*. Predominaram estudos sobre Cr (164), Pb (160), Cu (145) e Cd (121), enquanto água marinha ou salina e membranas foram identificadas em apenas 10 e 27 estudos, respectivamente. Conclui-se que a produção se concentra em biomassa de coco, matrizes residuais ou sintéticas e configurações convencionais, permanecendo limitada a articulação entre biomassas marinhas, matrizes salinas e sistemas de membrana ou fluxo contínuo.
Palavras-chave: Biossorção. Tratamento de águas. Resíduos agroindustriais. Macroalgas. Metais potencialmente tóxicos.

Área do Conhecimento: CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA (Química)

Introdução

A contaminação dos sistemas aquosos por metais constitui um problema ambiental relevante devido à sua presença em efluentes e corpos d'água, à possibilidade de acumulação nos ecossistemas e às dificuldades associadas à sua remoção e recuperação. A descarga desses contaminantes pode comprometer a qualidade da água e seu uso seguro, tornando necessário o desenvolvimento de tecnologias de tratamento ambientalmente adequadas e economicamente acessíveis (Carreira; Passos; Coutinho, 2023; Alsulaili; Elsayed; Refaie, 2024).

Nesse contexto, a adsorção e a biossorção utilizando biomassas residuais destacam-se como alternativas aos adsorventes convencionais. O aproveitamento de resíduos agrícolas e de outras biomassas permite associar a remoção de metais à obtenção de materiais de menor custo, à redução do descarte de resíduos e aos princípios da economia circular. Esses resíduos podem ser empregados diretamente ou convertidos em materiais como biocarvões e adsorventes ativados, ampliando suas possibilidades de aplicação no tratamento de águas (Ajien et al., 2023; Alsulaili; Elsayed; Refaie, 2024).

Entre as biomassas disponíveis, o coco representa uma fonte terrestre lignocelulósica, composta por resíduos agroindustriais que podem originar fibras, biocarvões, hidrogéis e outros materiais adsorventes (Jain; Aggarwal; Aggarwal, 2026). Em contraste, *Sargassum* corresponde a uma biomassa macroalgal marinha cuja disponibilidade e composição favorecem seu aproveitamento como biossorvente ou como matéria-prima para materiais modificados destinados à remoção de metais em água (Carreira; Passos; Coutinho, 2023; Flores-Martínez et al., 2026). A comparação entre essas biomassas possibilita examinar como materiais de origens terrestre e marinha vêm sendo estudados e valorizados para uma mesma finalidade ambiental.

Apesar dos avanços registrados, permanecem questões relacionadas ao desempenho desses materiais em águas salinas e em matrizes aquosas reais, nas quais a competição entre íons pode

alterar a adsorção, bem como à sua incorporação em membranas e à aplicação em sistemas contínuos, aspectos fundamentais para a transição da escala laboratorial para condições operacionais (Carreira; Passos; Coutinho, 2023; Gonzalez-Fernandez et al., 2025). Assim, este estudo objetiva analisar a evolução e as características da produção científica sobre o uso de materiais derivados de coco e *Sargassum* na adsorção de metais em matrizes aquosas, identificando tendências, aplicações e lacunas.

Metodologia

O estudo foi caracterizado como uma revisão de literatura com análise bibliométrica e triagem estruturada dos registros. As buscas foram realizadas nas bases Scopus e Web of Science, com atualização até setembro de 2026, utilizando estratégias separadas para materiais derivados de coco e *Sargassum*. Na Scopus, foram pesquisados título, resumo e palavras-chave por meio do campo TITLE-ABS-KEY; na Web of Science, utilizou-se o campo Tópico (TS). Não foram aplicadas restrições de período, idioma, tipo documental, área de conhecimento ou periódico. As estratégias e os resultados brutos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações de busca e número de documentos recuperados.

Base	Material	Estratégia de busca	Resultado
SCOPUS	Coco	TITLE-ABS-KEY (("heavy metal*" OR "metal ion*" OR lead OR cadmium OR chromium OR copper OR nickel OR zinc OR mercury OR arsenic) AND (adsorp* OR biosorp*) AND (coconut OR coir OR "coconut fiber*" OR "coconut shell*" OR "Cocos nucifera") AND (water OR wastewater OR seawater OR "aqueous solution*"))	732
	Sargassum	TITLE-ABS-KEY (("heavy metal*" OR "metal ion*" OR lead OR cadmium OR chromium OR copper OR nickel OR zinc OR mercury OR arsenic) AND (adsorp* OR biosorp*) AND (*Sargassum* OR "*Sargassum* spp.") AND (water OR wastewater OR seawater OR "aqueous solution*"))	307
WoS	Coco	TS (("heavy metal*" OR "metal ion*" OR lead OR cadmium OR chromium OR copper OR nickel OR zinc OR mercury OR arsenic) AND (adsorp* OR biosorp*) AND (coconut OR coir OR "coconut fiber*" OR "coconut shell*" OR "Cocos nucifera") AND (water OR wastewater OR seawater OR "aqueous solution*"))	1.001
	Sargassum	TS (("heavy metal*" OR "metal ion*" OR lead OR cadmium OR chromium OR copper OR nickel OR zinc OR mercury OR arsenic) AND (adsorp* OR biosorp*) AND (*Sargassum* OR "*Sargassum* spp.") AND (water OR wastewater OR seawater OR "aqueous solution*"))	461
		TOTAL	**2.501**

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

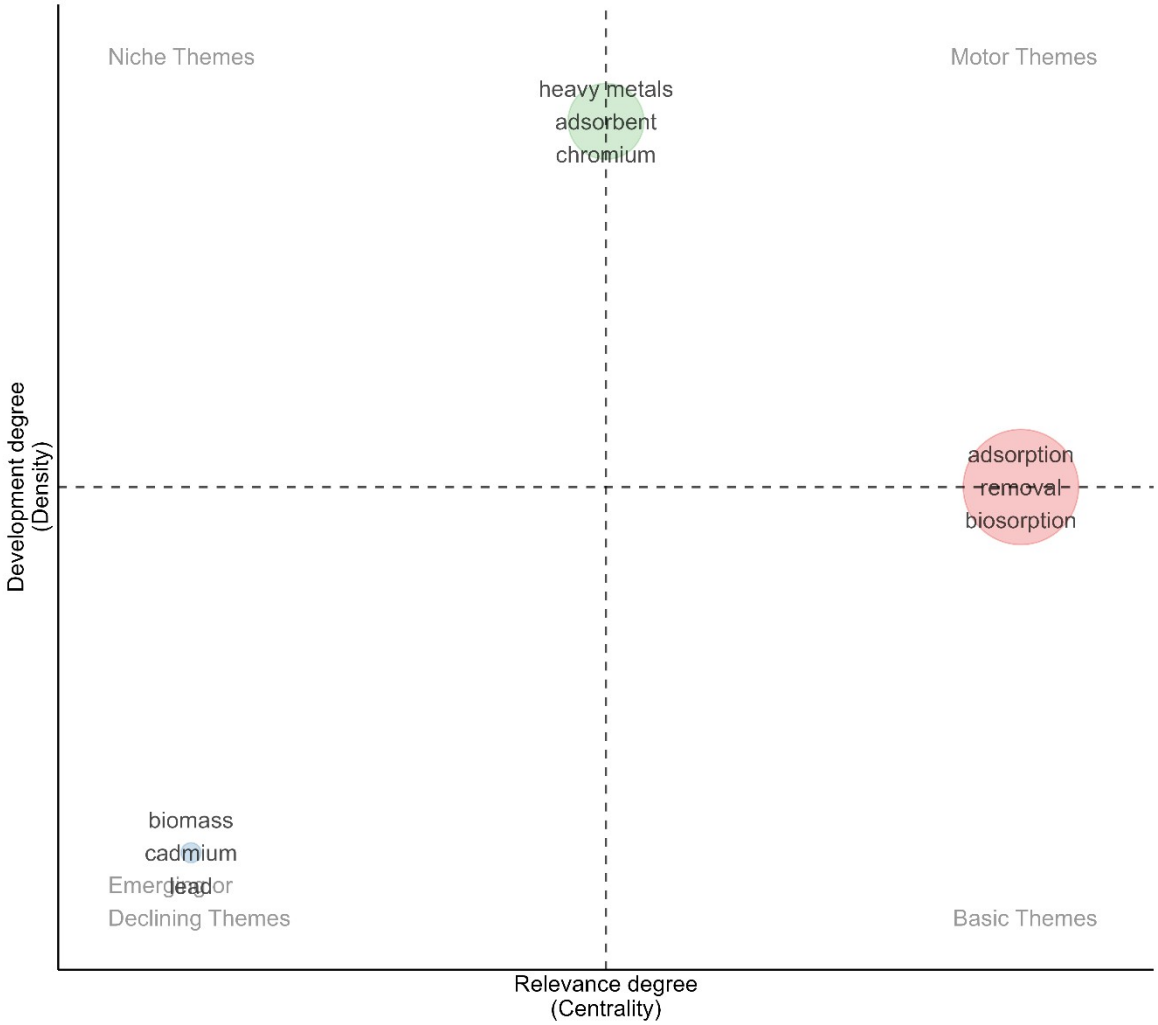
A análise bibliométrica foi realizada no ambiente R, versão 4.5.2, com o pacote Bibliometrix, versão 5.0. Os arquivos brutos foram exportados da Scopus e da Web of Science em formato BibTeX e carregados no programa para análise da produção científica anual, dos países dos autores correspondentes, da colaboração científica e da estrutura temática. O mapa temático foi gerado automaticamente pelo Bibliometrix, mantendo-se os parâmetros-padrão da versão utilizada, sem alterações manuais.

Após a unificação dos dados de duas bases e a remoção de duplicatas, restaram 1.757 registros únicos, que foram triados por título, resumo e palavras-chave. Foram selecionados apenas estudos focados na adsorção/biossorção de metais em meio aquoso utilizando derivados de coco ou *Sargassum*, excluindo-se pesquisas em outras matrizes (como solo, gás ou alimentos) ou com outros materiais e poluentes. Ao final do processo, 612 documentos foram incluídos para análise.

Resultados

O mapa temático, elaborado a partir dos 1.755 registros do corpus bibliométrico, mostrou que “adsorption”, “removal” e “biosorption” apresentaram elevada centralidade e densidade intermediária. Os termos “heavy metals”, “adsorbent” e “chromium” exibiram maior densidade e centralidade intermediária, enquanto “biomass”, “cadmium” e “lead” foram posicionados no quadrante de menor centralidade e densidade, correspondente a temas emergentes ou em declínio (Figura 1).

Figura 1 –Mapa temático segundo centralidade e densidade.



Fonte: elaboração própria com base nos metadados analisados.

Entre os 612 estudos incluídos, 429 (70,1%) abordaram materiais derivados de coco e 183 (29,9%) utilizaram *Sargassum*, evidenciando maior presença da biomassa terrestre no conjunto documental analisado. Os resultados da triagem estruturada mostraram predominância de Cr(VI/III), Pb(II), Cu(II) e Cd(II), identificados em 164, 160, 145 e 121 estudos, respectivamente. As aplicações concentraram-se em águas residuais ou efluentes reais (285) e soluções aquosas ou sintéticas (212), enquanto apenas 10 estudos mencionaram água marinha ou salina. Quanto aos materiais, prevaleceram carvão ativado (180), pó ou partículas (122), biochar ou carvão (75) e compósitos ou materiais híbridos (68). Membranas ou mantas foram registradas em 27 estudos. Os ensaios em batelada foram os mais frequentes, aparecendo em 223 estudos, em comparação com 57 aplicações em coluna ou leito fixo, 45 em sistemas contínuos e 19 envolvendo membrana ou filtração. Os principais resultados quantitativos são sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Síntese das características dos estudos incluídos.

Dimensão	Categorias predominantes, n (%)
Biomassa	Coco: 429 (70,1%); *Sargassum*: 183 (29,9%)
Metais	Cr: 164 (26,8%); Pb: 160 (26,1%); Cu: 145 (23,7%); Cd: 121 (19,8%)
Matriz aquosa	Água residual/efluente: 285 (46,6%); solução aquosa/sintética: 212 (34,6%); água marinha/salina: 10 (1,6%)
Forma do material	Carvão ativado: 180 (29,4%); pó/partículas: 122 (19,9%); biochar/carvão: 75 (12,3%); compósito/híbrido: 68 (11,1%); membrana/manta: 27 (4,4%)
Sistema experimental	Batelada: 223 (36,4%); coluna/leito fixo: 57 (9,3%); contínuo/fluxo: 45 (7,4%); membrana/filtração: 19 (3,1%)

Fonte: elaboração própria.

Discussão

O maior número de estudos sobre materiais derivados de coco em comparação com *Sargassum* revela uma assimetria na produção científica, mas não permite concluir que a biomassa terrestre apresenta melhor desempenho adsorptivo. A literatura documenta ampla diversificação tecnológica do coco em fibras, carvões ativados, biochar, compósitos e outros materiais destinados ao tratamento de águas (Ajien et al., 2023; Jain; Aggarwal; Aggarwal, 2026), o que é compatível com sua maior frequência na base. Entretanto, essa associação não demonstra causalidade, e a superioridade de uma biomassa somente poderia ser estabelecida mediante ensaios comparativos realizados sob condições equivalentes de metal, pH, concentração, dose e matriz aquosa.

O predomínio de carvão ativado, pó ou partículas e ensaios em batelada mostra que a produção permanece concentrada na preparação de adsorventes e na avaliação de equilíbrio e cinética em condições controladas. A posição central dos termos “adsorption”, “removal” e “biosorption” no mapa temático confirma a consolidação desse núcleo conceitual. A conversão de resíduos agrícolas em materiais carbonáceos amplia a área superficial e a disponibilidade de sítios de adsorção, embora diferentes processos de pirólise, ativação e modificação produzam propriedades distintas (Ajien et al., 2023; Alsulaili; Elsayed; Refaie, 2024). Assim, a elevada frequência desses materiais não implica desempenho uniforme nem aplicação imediata em escala operacional.

A pequena participação de água marinha ou salina é particularmente relevante no caso de *Sargassum*, pois a origem marinha da biomassa não significa que seu desempenho tenha sido amplamente avaliado em água do mar. Em matrizes salinas, força iônica e competição entre diferentes íons podem modificar a disponibilidade dos sítios ativos, a seletividade e a capacidade aparente de adsorção. Carreira, Passos e Coutinho (2023) identificaram a competição iônica e a escassez de estudos em matrizes reais como limitações recorrentes na biossorção com algas. Embora Kumar et al. (2025) tenham avaliado biochar de *Sargassum duplicatum* em diferentes fontes de água, incluindo água marinha, resultados isolados não podem ser generalizados para outras espécies, materiais ou composições salinas.

A baixa ocorrência de membranas, colunas e sistemas contínuos também delimita a transição entre estudos de bancada e aplicações operacionais. Trabalhos recentes demonstram a possibilidade de empregar coco e *Sargassum* em colunas de leito fixo e comparar condições de batelada e fluxo contínuo (Gawas; Sutar; Gokhale, 2025; Cardoso et al., 2025; Gonzalez-Fernandez et al., 2025). Também foram identificadas membranas híbridas contendo carvão ativado derivado de coco, mas esse tipo de configuração permanece numericamente reduzido no conjunto analisado (El-Shalakany; Samir; Mubarak, 2026). A avaliação em fluxo exige considerar vazão, altura do leito, tempo de residência, perda de carga, curvas de ruptura e estabilidade mecânica, parâmetros que não podem ser representados adequadamente apenas por experimentos em batelada.

A lacuna central consiste, portanto, na ausência de estudos comparativos e padronizados que avaliem biomassas terrestre e marinha sob as mesmas condições experimentais, especialmente em água salina e na presença de íons concorrentes. Esses estudos devem integrar seletividade, regeneração por vários ciclos, estabilidade do material e configurações de membrana, coluna ou fluxo contínuo. Essa abordagem permitiria examinar com maior rigor o desempenho dos materiais e, simultaneamente, fortalecer a valorização sustentável de resíduos lignocelulósicos de coco e da biomassa de *Sargassum* como recursos para o tratamento de águas.

Conclusão

A análise da evolução e das características da produção científica mostrou concentração dos estudos em materiais derivados de coco, na remoção de Cr, Pb, Cu e Cd, em matrizes residuais ou sintéticas e em configurações convencionais de adsorção, principalmente com materiais particulados e ensaios em batelada. Em comparação, *Sargassum*, água marinha ou salina, membranas e sistemas contínuos permanecem menos explorados. Esses resultados não permitem estabelecer superioridade entre as biomassas, mas evidenciam a necessidade de estudos experimentais comparáveis e padronizados que avaliem seletividade na presença de íons concorrentes, efeito da salinidade, eficiência, capacidade de adsorção, regeneração e desempenho em operação contínua.

Referências

AJIEN, A.; IDRIS, J.; MD SOFWAN, N.; HUSEN, R.; SELI, H. Coconut shell and husk biochar: a review of production and activation technology, economic, financial aspect and application. *Waste Management and Research*, 2023. DOI: 10.1177/0734242X221127167.

ALSULAILI, A.; ELSAYED, K.; REFAIE, A. Utilization of agriculture waste materials as sustainable adsorbents for heavy metal removal: a comprehensive review. *Journal of Engineering Research*, 2024. DOI: 10.1016/j.jer.2023.09.018.

CARDOSO, A. P.; CARVALHO, N. S.; VENEU, D. M.; VALDIVIEZO-GONZALES, L.; PINO, A. H.; TOREM, M. L. Comparative evaluation of lead and manganese removal from contaminated water using *Cocos nucifera* shell powder in batch and continuous adsorption systems. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2025. DOI: 10.1016/j.sajce.2025.06.003.

CARREIRA, A. R. F.; PASSOS, H.; COUTINHO, J. A. P. Metal biosorption onto non-living algae: a critical review on metal recovery from wastewater. *Green Chemistry*, 2023. DOI: 10.1039/d3gc01993d.

EL-SHALAKANY, H. H.; SAMIR, I.; MUBARAK, M. F. Fabrication and characterization of an activated carbon-chitosan-graphene oxide hybrid membrane with hierarchical porosity for the simultaneous adsorptive removal of ciprofloxacin antibiotic and hazardous heavy metals from polluted water systems. *RSC Advances*, 2026. DOI: 10.1039/d5ra08891g.

FLORES-MARTÍNEZ, M. G.; LOUVIER-HERNÁNDEZ, J. F.; PATIÑO-HERRERA, R.; DEL CARMEN FLORES FLORES, T. Eco-friendly beads from *Sargassum* biomass and biochar reinforced with chitosan for removing Cr(VI) from water. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2026. DOI: 10.1007/s11270-026-09365-9.

GAWAS, A. S.; SUTAR, P. R.; GOKHALE, J. S. Biosorption of vanadium (V) and chromium (VI) using abscised coconut leaves powder: equilibrium and continuous packed bed column studies. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2025. DOI: 10.1016/j.enceco.2024.10.003.

GONZALEZ-FERNANDEZ, L. A.; AGUIRRE-CONTRERAS, S.; MEDELLIN-CASTILLO, N. A.; SANCHEZ-POLO, M.; NAVARRO-FROMETA, A. E.; LEYVA-RAMOS, R.; VILASO-CADRE, J. E.; OCAMPO-PEREZ, R. Mathematical modelling of kinetic and breakthrough curves for Cd(II) adsorption onto *Sargassum* biomass using the diffusion-permeation model. *Journal of Water Process Engineering*, 2025. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.108473.

JAIN, H.; AGGARWAL, A.; AGGARWAL, N. K. Valorisation of coconut coir for circular bioeconomy: a comprehensive review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2026. DOI: 10.1007/s13399-026-07208-5.

KUMAR, P.; PATEL, A. K.; SINGHANIA, R. R.; SUMATHI, Y.; CHEN, C. W.; DONG, C. D. Enhanced copper(II) bioremediation using *Sargassum duplicatum* derived biochar from various water sources. *Energy & Environment*, 2025. DOI: 10.1177/0958305X241259511.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem ao Laboratório de Preparo de Amostras e Análises Químicas (LaPAQui), ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGEN) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo suporte institucional e infraestrutura concedidos para a realização desta pesquisa.