



Panorama e tendências da pesquisa brasileira sobre biochar no tratamento de águas: Uma análise bibliométrica

Carlos Eduardo Machado de Oliveira¹

Resumo

Nas últimas décadas, a pesquisa sobre a aplicação do biochar no tratamento de águas tem emergido como um tema de crescente relevância científica. Diante desse cenário, o presente estudo realiza uma análise bibliométrica com o objetivo de mapear o panorama e as tendências da pesquisa brasileira voltada à utilização do biochar para tratamento de águas, destacando sua evolução temporal, principais autores e instituições, periódicos de maior impacto, redes de colaboração internacional e palavras-chave mais recorrentes. A busca booleana foi conduzida na base de dados Scopus, resultando em 268 documentos publicados entre 2010 e 2025. Para a análise quantitativa e visual dos dados, foram utilizadas as ferramentas VOSviewer e Bibliometrix. Os resultados revelam um crescimento expressivo das publicações, especialmente após 2018, com uma taxa média anual de 32%. Observou-se ainda uma forte colaboração entre pesquisadores brasileiros e internacionais. Este estudo identifica os principais atores científicos e institucionais do campo e fornece perspectivas futuras sobre o avanço e consolidação do uso do biochar para o tratamento de águas.

Palavras-chave: Biochar; Tratamento de águas residuais; Análise bibliométrica; Adsorção; Remoção de contaminantes.

Overview and trends of brazilian research on biochar in water treatment: A bibliometric analysis

Abstract

In recent decades, research on the application of biochar for water treatment has emerged as a topic of growing scientific relevance. In this context, the present study conducts a bibliometric analysis aimed at mapping the landscape and trends of Brazilian research focused on the use of biochar for water treatment, highlighting its temporal evolution, main authors and institutions, leading journals, international collaboration networks, and the most frequently used keywords. A Boolean search was carried out in the Scopus database, identifying 268 documents published between 2010 and 2025. Quantitative and visual analyses were performed using the VOSviewer and Bibliometrix tools. The results reveal a significant increase in publications, particularly after 2018, with an annual growth rate of 32.2%. Furthermore, a strong collaboration between Brazilian and international researchers was observed. This study identifies the main scientific and institutional contributors to the field.

¹ Pós-graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará – UFC; Brasil, Professor substituto da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA; edu.machad4@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8870-6937>; <https://lattes.cnpq.br/2146460017776322>.

and provides future perspectives on the advancement and consolidation of biochar applications for water treatment.

Keywords: Biochar; Wastewater treatment; Bibliometric analysis; Adsorption; Pollutant removal.

1 Introdução

O crescimento populacional e o avanço da industrialização têm intensificados diversos problemas ambientais, como a poluição e a escassez de água (Barquilha & Braga, 2021; Biswal & Balasubramanian, 2022), os quais se consolidam como problemas urgentes para a sociedade contemporânea. Nesse contexto, cresce o interesse pelo desenvolvimento de materiais sustentáveis e de baixo custo para o tratamento de águas, impulsionado principalmente pela necessidade de soluções eficientes para a remoção de contaminantes e pelo avanço de tecnologias ambientalmente responsáveis e economicamente viáveis e adaptáveis a diferentes contextos socioeconômicos.

Entre esses materiais, o biochar tem se destacado como uma solução promissora no tratamento de águas devido às suas propriedades físico-químicas que favorecem a alta eficiente na adsorção e remoção de contaminantes (Qiu *et al.*, 2022; Xu, Gao, *et al.*, 2025), como também sua facilidade de utilização e ausência de contaminação secundária (Lima *et al.*, 2025). O biochar é um material sólido rico em carbono e obtido pelo processo de pirólise de biomassas, apresentando alta área superficial, estrutura porosa e estabilidade química (Gwenzi *et al.*, 2017; Xu, Du, *et al.*, 2025).

Com o aumento do interesse científico e tecnológico sobre o uso do biochar no tratamento de águas, observa-se uma rápida expansão das publicações relacionadas ao tema. Nesse contexto, torna-se necessário compreender não apenas as propriedades e mecanismos de atuação, mas também a dinâmica científica que tem sustentado esse avanço das pesquisas. Para isso, as análises bibliométricas representam uma ferramenta fundamental para mapear o desenvolvimento do campo, identificar tendências, desafios e lacunas, além de revelar os principais autores, instituições e redes de colaboração que impulsionam esse conhecimento (Bilias *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024).

Diversas análises bibliométricas têm sido conduzidas com o intuito de compreender o desenvolvimento do uso do biochar para tratamento de águas. Wang *et al.* (2024b), por exemplo, analisaram o status da pesquisa, as tendências e os mecanismos de adsorção do

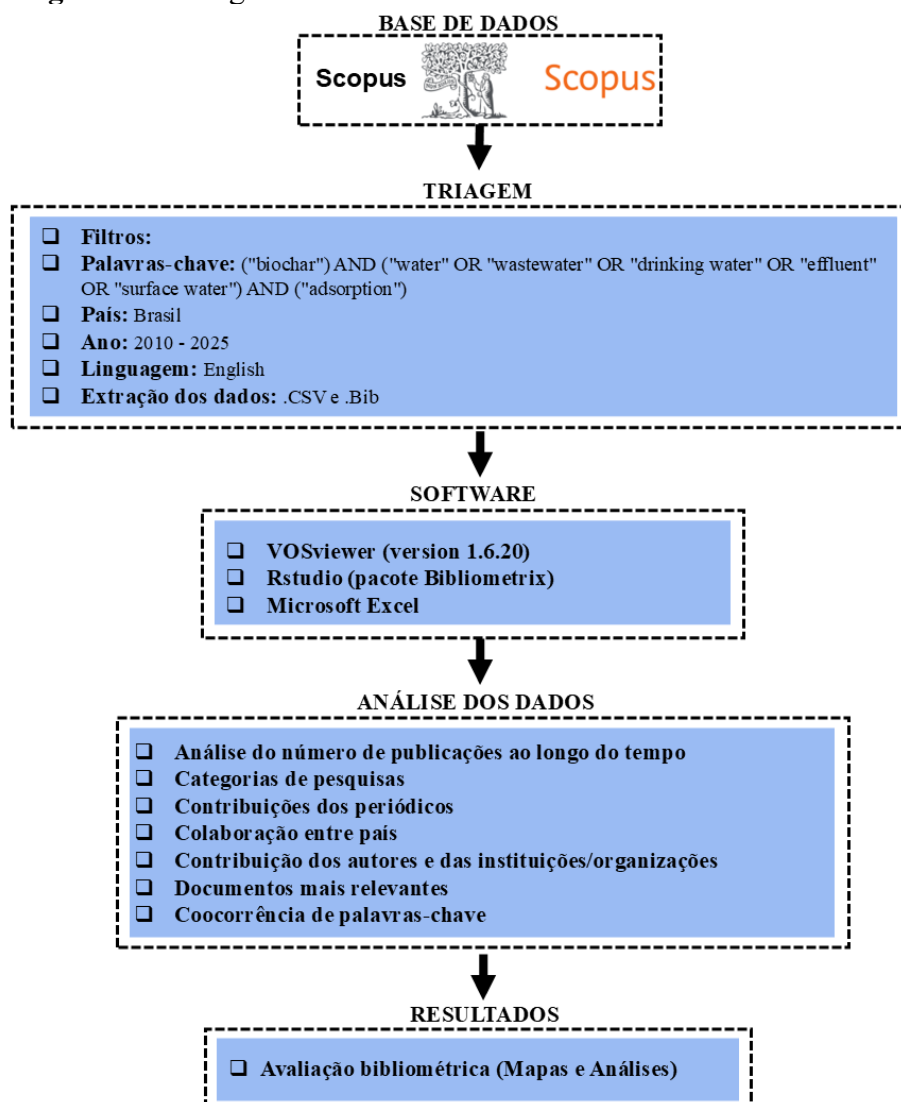
biochar para tratamento de águas residuais, considerando publicações do período de 2011 - 2022. De modo semelhante, Vinayagam *et al.* (2025) e Shetty *et al.* (2025) desenvolveram análises bibliométricas voltadas a identificar as tendências, desafios e direções futuras da aplicação do biochar na adsorção de compostos específicos, como a tetraciclina e o clorpirifós, respectivamente.

Apesar do crescente interesse internacional, observa-se uma lacuna quanto à sistematização das pesquisas desenvolvidas no contexto brasileiro. Até o momento, não foram identificados estudos bibliométricos que analisem de forma exclusiva a produção científica nacional sobre o uso do biochar no tratamento de águas. Dessa forma, o presente estudo visa suprir essa lacuna na literatura e contribuir para a quantificação das pesquisas brasileiras sobre o tema.

Sendo assim, o objetivo desse estudo é fazer uma análise bibliométrica sobre o panorama e tendências da pesquisa brasileira sobre a utilização de biochar para aplicação no tratamento de águas, destacando sua evolução temporal, principais autores e instituições, principais periódicos, análise da rede de colaboração entre os países e as principais palavras-chave utilizadas nos documentos

2 Metodologia

Este estudo emprega uma análise bibliométrica para investigar o panorama e as tendências da pesquisa brasileira sobre aplicação de biochar para tratamento de águas, analisando a evolução temporal das publicações, principais contribuidores, mapeamento das palavras-chave, principais redes de colaborações entre países, principais instituições, documentos mais relevantes e tendências. A Figura 1 ilustra o processo adotado neste estudo.

Figura 1: Fluxograma da análise bibliométrica utilizada neste estudo

Fonte: Autor (2025).

2.1 Base de dados e critérios de pesquisa

A base de dados Scopus foi selecionada como fonte primária de dados devido à sua extensa indexação de literatura revisadas por pares (Faisal *et al.*, 2025). A busca foi realizada em 24 de outubro de 2025, abrangendo publicações de 2010 a 2025. Para a recuperação dos artigos foram usadas as seguintes palavras-chave: Biochar, water, wastewater, drinking water, efluente, surface water e adsorption. A partir das palavras-chave mencionadas, foi formulado a seguinte sequencias de busca booleanas: ("biochar") AND ("water" OR "wastewater" OR "drinking water" OR "effluent" OR "surface water") AND ("adsorption").

A busca inicial resultou em 10.330 publicações, incluindo artigos, revisões, trabalhos de conferências e capítulos de livros. Após a coleta dos dados na Scopus, foram

implementadas as etapas de limpeza e filtragem para garantir a consistência e a relevância dos artigos selecionados. Inicialmente, aplicou-se um filtro para selecionar apenas estudos publicados por pesquisadores brasileiros e produzidos em língua inglesa, o que resultou em 268 publicações, entre artigos e artigos de revisões (Figura 1). Em seguida, todos os trabalhos selecionados passaram por triagem, consistindo na leitura dos títulos e resumos, com o objetivo de verificar a adequação temática dos documentos, sem exclusão de registros. Por fim, os resultados foram exportados nos formatos BibTex (.bib) e CSV (.csv), para a posterior análise nos softwares de análise bibliométrica.

2.2 Software utilizados

Neste estudo, foram utilizados o RStudio (pacote Bibliometrix), VOSviewer versão 1.6.20 e o Microsoft Excel. O Microsoft Excel foi utilizado principalmente para filtrar e organizar o conjunto de dados, bem como para criar tabelas e gráficos. O VOSviewer foi usado para analisar os dados, gerando gráficos e tabelas detalhadas para identificar padrões de pesquisa. Por meio desse software, foram criadas as redes de citações, mapas de coocorrência, nuvens de palavras e tópicos de tendência. Já o RStudio Bibliometrix foi usado especificamente para construir e visualizar rede de colaborações internacionais entre os países.

3 Resultados e discussões

3.1 Visão geral da literatura sobre biochar para tratamento de águas

A análise bibliométrica da pesquisa sobre aplicação de biochar no tratamento de águas, realizada na Scopus no período de 2010 a 2025, identificou um total de 268 documentos, produzidos por 1.260 autores distintos. Esses trabalhos estão distribuídos em 329 artigos de pesquisa, 22 artigos de revisão, 5 capítulos de livro e 2 artigos de conferências (Tabela 1). Os documentos selecionados foram publicados em 113 fontes diferentes, incluindo periódicos e livros. O campo experimental apresenta uma taxa de crescimento anual de 32%, evidenciando o aumento expressivo do interesse científico e tecnológico na utilização do biochar para o tratamento de águas (Tabela 1).

Tabela 1: Visão geral dos dados recuperados do banco de dados Scopus

DESCRIÇÃO	RESULTADOS
Informações principais sobre os dados	
Lapso temporal	2010:2025
Periódicos	113
Documentos	268
Taxa de crescimento anual %	32
Idade média dos documentos (anos)	2,56
Média de citações por documento	34,86
Referências	2381
Conteúdo dos documentos	
Palavras-chave Plus (ID)	2561
Palavras-chave dos autores (DE)	747
Autores	
Autores	1260
Autores de documentos de autoria única	0
Colaboração entre autores	
Documentos de autoria única	0
Média de Coautores por documento	7
Colaborações internacionais (%)	45,52
Tipos de documentos	
Artigo	239
Capítulo de livro	5
Artigo de conferência	2
Artigo de revisão	22

Fonte: Autor (2025).

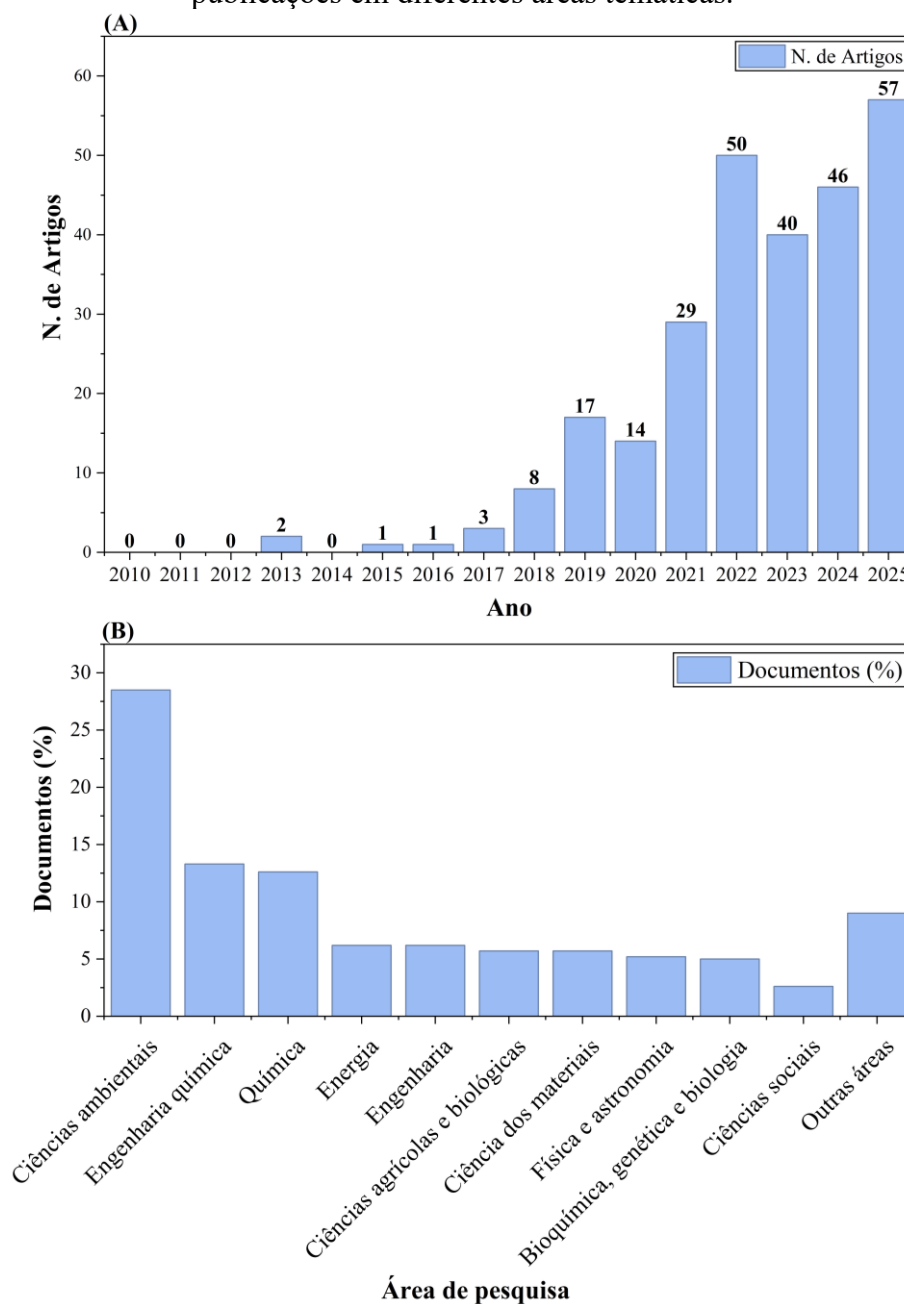
Além disso, é possível perceber que nenhum artigo foi publicado com autoria única, destacando uma forte colaboração entre autores. Cada documento, em média, tem 7,00 coautores, com 45,52% envolvendo coautoria internacional, sugerindo o posicionamento dos pesquisadores brasileiros no cenário global. A idade média dos documentos selecionados possui 2,56 anos, o que indica a recente chegada dos autores brasileiros no cenário. Além disso, os documentos apresentam uma média de 34,86 citações por artigos, indicando que essas publicações são impactantes e frequentemente referenciadas em estudos relacionado ao tema.

3.1 Análise de publicações e categorias de pesquisa

A Figura 2.A apresenta a tendência anual de publicações sobre o tratamento de águas. Apesar da análise bibliométrica abranger o lapso temporal de 2010 a 2025, notou-se que a primeira publicação por pesquisadores brasileiros sobre o tema foi realizada apenas 2013, ano que apresentou somente 2 publicações. Após isso, percebe-se que o número de publicações se manteve quase constante até o ano de 2017. Após 2018, o número de publicações apresentou um aumento expressivo, atingindo seu pico em 2025, contando com 57 documentos publicados até então.

Esse crescimento pode ter sido impulsionado não apenas pela maior conscientização sobre sustentabilidade, pelos avanços tecnológicos e pelas preocupações relacionadas à poluição e escassez hídrica, mas também pelo crescente interesse da comunidade científica na utilização do biochar como adsorvente e como ferramenta de mitigação dos impactos ambientais negativos decorrente das mudanças climáticas (Meena *et al.*, 2025). Além desses fatores, destaca-se ainda a expansão do mercado global do biochar, cuja indústria apresentou um expressivo crescimento entre os anos de 2021 e 2023, onde o setor registrou um crescimento econômico de aproximadamente 97% (International Biochar Initiative, 2023), evidenciando a rápida consolidação do biochar como material estratégico em diversas aplicações.

Figura 2: Evolução das publicações (A) Número de publicações por ano (B) Número de publicações em diferentes áreas temáticas.



Fonte: Autor (2025).

Nas últimas décadas, as pesquisas sobre a aplicação de biochar para tratamento de água têm adotado uma abordagem interdisciplinar, abrangendo diversas disciplinas como ciências ambientais, engenharia química, química, energia, engenharia, ciências agrícolas e biológicas, entre outras, conforme pode ser observado na Figura 2.B. O maior número de documentos publicados foi na área de ciências ambientais, contemplando cerca de 28,90% das

publicações analisadas, seguida por engenharia química e química, com 13,3% e 12,6% das publicações, respectivamente.

3.2 Contribuições dos Periódicos

A análise das fontes documentais revelou que os 268 documentos se encontram distribuídos entre 113 periódicos. A Tabela 2 mostra os dez principais periódicos mais produtivos, que concentram aproximadamente 33,60% das publicações sobre o uso do biochar para tratamento de águas, considerando o número de documentos e fatores de impactos correspondentes.

O periódico *Environmental science and pollution research* destaca-se como o mais produtivo, com 20 documentos, 504 citações e SJR de 1,004, mostrando sua relevância na divulgação de estudo nesse campo de pesquisa. Em seguida, o *Journal of environmental chemical engineering* apresenta 18 artigos e 630 citações. O periódico *Science of the total environment*, embora conte apenas com setes artigos sobre o tema, destaca-se por apresentar o maior impacto em termos de citações, totalizando 762, o que indica uma elevada visibilidade e influência acadêmica de suas publicações.

Tabela 2: Periódicos mais produtivos.

R	Periódicos	NP	H-index	CT	SJR	APP
1	Environmental science and pollution research	20	11	504	1,004	2016
2	Journal of environmental chemical engineering	18	13	630	1,454	2018
3	Science of the total environment	7	7	762	2,137	2018
4	Chemosphere	7	6	240	1,896	2013
5	Journal of cleaner production	7	6	662	2,174	2018
6	Colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects	7	5	310	0,944	2020
7	Journal of environmental management	6	5	244	1,994	2017
8	Journal of molecular liquids	6	5	382	0,935	2019
9	Journal of water process engineering	6	3	131	1,348	2022
10	Water (switzerland)	6	3	16	0,752	2022

Fonte: Autor (2025).

Legenda: R – Ranking; NP – Número de publicação; CT – Citação total; SJR - Scimago Journal & Country Rank (2024); APP - Ano da primeira publicação.



3.3 Principais autores e instituições

A análise dos artigos selecionados resultou em 1.260 autores que contribuíram para os estudos relacionados ao biochar aplicado ao tratamento de água nos últimos 15 anos. A Tabela 3 apresenta os dez principais autores que mais destacaram nesse campo científico, considerando o número de publicações, citações e índices de impacto (H e G).

Os pesquisadores Eder Claudio Lima e Guilherme Luís Dotto sobressaem-se como os principais autores em termos de produtividade científica, com 33 publicações cada. No entanto, quando se analisa o impacto das citações, observa-se que Eder Cláudio Lima apresenta um desempenho expressivo, acumulando 2.764 citações e um índice H de 21, o que evidência a relevância e a influência de suas contribuições para o desenvolvimento do tema.

Além deles, destacam-se Lucas Meili e Glaydson Simões do Reis, com 16 e 14 publicações, respectivamente, ambos com elevado número de citações (863 e 846). Nota-se ainda que grande parte desses autores iniciou suas publicações sobre o tema após 2018, o que demonstra um crescimento recente e aceleração da produção científica nacional voltada ao uso do biochar em processos de tratamento de águas.

Tabela 3: Autores que mais contribuíram.

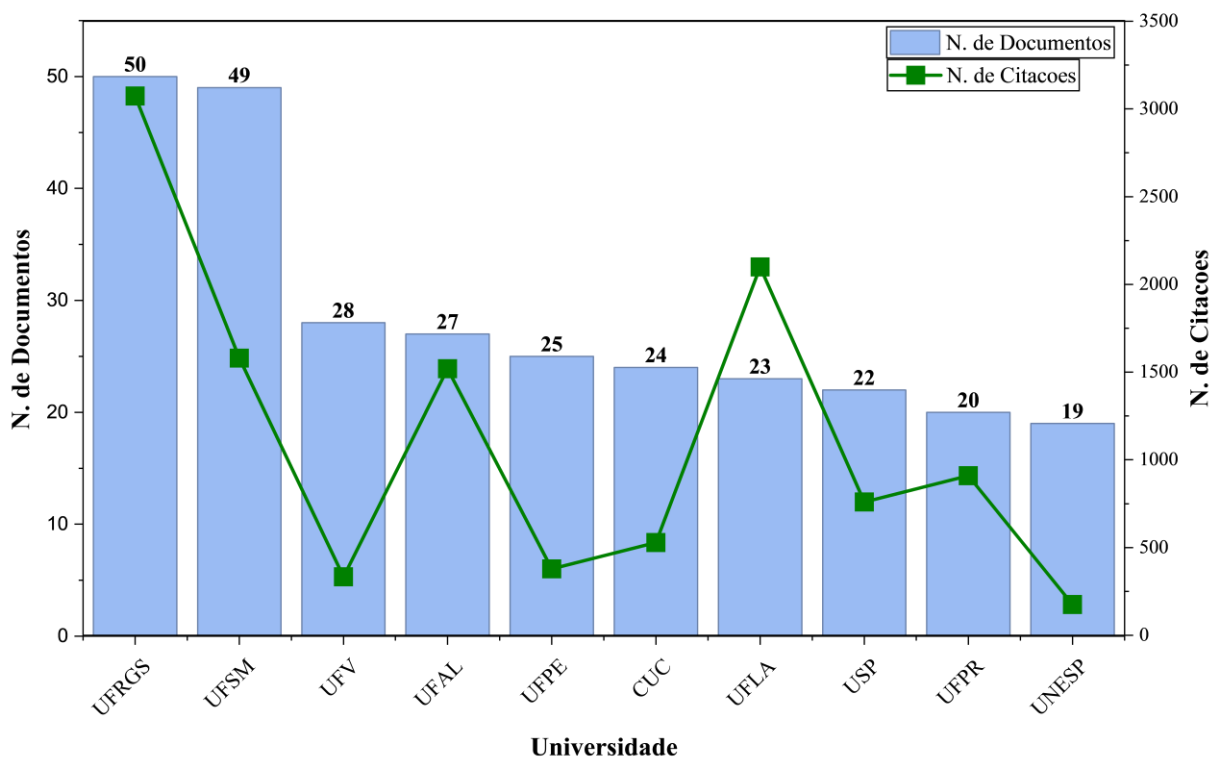
Ranking	Autor	Artigos	Citações	H_Index	G_Index	Primeira publicação
1	Lima, Eder C.	33	2764	21	33	2018
2	Dotto, G. L.	33	1134	16	33	2018
3	Dos Reis, G. S.	16	863	13	16	2021
4	Meili, L.	14	846	12	14	2019
5	Silva, L. F. O.	13	214	6	13	2021
6	Grimm, A.	10	548	9	10	2022
7	Godinho, M.	10	470	6	10	2018
8	Franco, D. S. P.	9	236	7	9	2022
9	Georgin, J.	8	217	7	8	2022
10	Collazzo, G. C.	8	509	6	8	2018

Fonte: Autor (2025).

Com base nas afiliações institucionais dos autores, foram identificadas 599 instituições que demonstram interesse no uso do biochar para tratamento de água. A Figura 3 apresenta as 10 instituições que mais contribuíram em termos de número de publicações sobre o tema. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) destacou-se com o maior número de publicações, totalizando 50 documentos, seguida pela Universidade Federal de Santa Maria

(UFSM) e pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), com 49 e 28 publicações, respectivamente.

Figura 3: As 10 principais instituições mais produtivas durante 2010–2025



Fonte: Autor (2025).

Adicionalmente, observa-se que a Universidade Federal de Lavras (UFLA), embora apresente uma menor quantidade de documentos publicados em comparação com outras instituições destacadas anteriormente, demonstra um desempenho expressivo em termos de impacto científico, acumulando aproximadamente 2.100 citações. Esse resultado posiciona a UFLA como a segunda instituição com o maior número de citações, evidenciando a relevância e a qualidade das pesquisas desenvolvidas por seus pesquisadores na área.

3.4 Documentos mais relevantes

A frequência de citações dos artigos reflete diretamente o grau de interesse e as tendências predominantes de investigação no campo científico (Jiang *et al.*, 2018). A Tabela 4 apresenta os dez artigos mais citados neste domínio. O artigo de Sophia A. *et al.*, (2018), intitulado de “Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption”, destaca-se como o documento mais citado, com 802 citações totais e um índice médio anual

de 100,25 citações, evidenciando sua forte influência nas pesquisas desse campo. Em seguida, o trabalho de Domingues *et al.* (2017) e o de Tran *et al.* (2020) ocupam, respectivamente, a segunda e terceira posição com 535 e 371 citações totais.

Tabela 4: Principais documentos mais citados.

R	Autor e ano	Documento	CT	CA
1	Sophia A., C. <i>et al.</i> , 2018	10.1016/j.ecoenv.2017.12.026	802	100,25
2	Domingues, R. R. <i>et al.</i> , 2017	10.1371/journal.pone.0176884	535	59,44
3	Than, H. N. <i>et al.</i> , 2020	10.1016/j.jhazmat.2020.122255	371	61,83
4	Alves, D. C. da S. <i>et al.</i> , 2021	10.3390/molecules26030594	266	53,2
5	Zazycki, M. A. <i>et al.</i> , 2018	10.1016/j.jclepro.2017.10.007	226	28,25
6	Cavali, M. <i>et al.</i> , 2023	10.1016/j.scitotenv.2022.159627	213	71
7	Tomul, F. <i>et al.</i> , 2020	10.1016/j.scitotenv.2020.137828	201	33,5
8	Anastopoulos, I. <i>et al.</i> , 2019	10.1016/j.molliq.2019.111684	180	25,71
9	Barquilha, C. E. R. <i>et al.</i> , 2021	10.1016/j.biteb.2021.100728	173	34,6
10	Rangabhashiyam, S. <i>et al.</i> , 2021	10.1016/j.envpol.2021.118581	171	42,75

Fonte: Autor (2025).

Legenda: R – Ranking; CT – Citações totais; CA – Citações médias por ano.

Entre os 10 documentos artigos mais citados, nota-se a predominância de artigos de revisão, indicando a maturidade e consolidação da temática relacionada ao uso do biochar como material para tratamento de águas. Alguns estudos abordam desde os fundamentos da adsorção de contaminantes (Barquilha & Braga, 2021; Sophia A. & Lima, 2018) até análises críticas sobre a aplicação de biochar derivado de lixo de esgoto e seus desafios ambientais (Rangabhashiyam *et al.*, 2022). Esses estudos sintetizam avanços relevantes quanto aos mecanismos de adsorção, influência das propriedades físico-químicas do biochar e limitações associadas à regeneração e ao descarte do material.

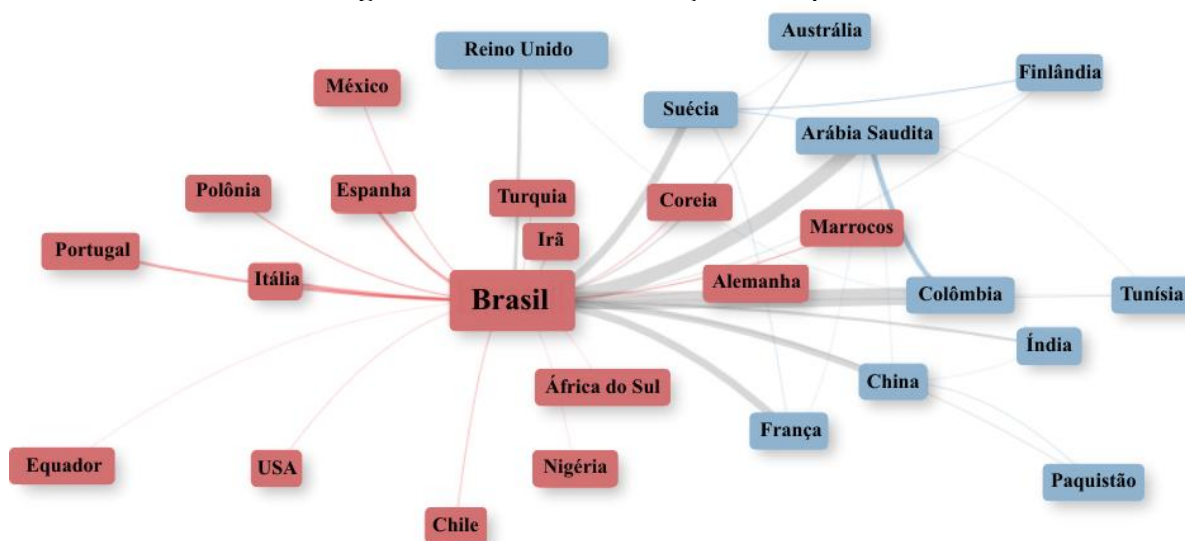
Por outro lado, artigos de pesquisas experimental também figuram entre os mais citados, demonstrando a importância de estudos aplicados para o avanço do campo de pesquisa. Trabalhos como o de Domingues *et al.* (2017) investigaram a produção e caracterização de biochars a partir de diferentes biomassas, estabelecendo relações entre matéria-prima, propriedades físico-químicas e potencial de aplicação industrial. Adicionalmente, outros estudos concentraram-se na remoção de poluentes específicos,

incluindo corantes industriais (Zazycki *et al.*, 2018) e fármacos presentes em matrizes aquosas (Tran *et al.*, 2020; Tomul *et al.*, 2020), reforçando o papel desses materiais como alternativas eficientes e de baixo custo para o tratamento de águas contaminadas.

3.5 Rede de pesquisa colaborativa entre países

A Figura 4 apresenta a rede de colaboração entre os pesquisadores brasileiros e internacionais. Embora as pesquisas sejam conduzidas por pesquisadores brasileiros, observa-se uma ampla rede de cooperação científica com instituições e pesquisadores internacionais, evidenciando o caráter colaborativo e a inserção no cenário global da produção nacional. Foram identificadas parcerias com 48 países, contudo, a análise considerou apenas aqueles com no mínimo cinco publicações em coautoria, o que resultou em 22 países. Em termos de força total de ligação, o Brasil apresenta uma forte interação com diversos países, destacando-se Arábia Saudita (56), Colômbia (54), Suíça (49), França (33) e China (30).

Figura 4: Rede de colaboração entre países.



Fonte: Autor (2025).

Além da colaboração internacional, observa-se também uma ampla e consolidada rede interna de colaboração entre pesquisadores brasileiros. Essa dinâmica revela uma articulação nacional sólida, indicando que a pesquisa sobre o uso do biochar no tratamento de águas já se encontra bem estabelecida e sustentada por conexões consistentes entre os grupos de pesquisa do país.

3.6 Principais palavras-chave

As palavras-chave refletem diretamente o objetivo principal das pesquisas e, por meio de sua análise, é possível obter insights valiosos sobre os avanços e tendências das pesquisas em determinada área do conhecimento (Mari Selvam & Balasubramanian, 2023). A Tabela 5 apresenta as dez palavras-chaves mais frequentemente utilizadas nos artigos analisados.

Observou-se que o termo “adsorption” se destaca como o mais recorrente, com 211 ocorrências e uma força de ligação de 3080, indicando sua centralidade temática nas investigações sobre biochar aplicado ao tratamento de água. Em seguida, destacam-se as palavras-chaves “biochar” e “charcoal”, com 203 e 89 ocorrências, respectivamente, e força ligações de 2840 e 1939, o que mostra a importância desses termos na estrutura conceitual e metodológica do campo estudado.

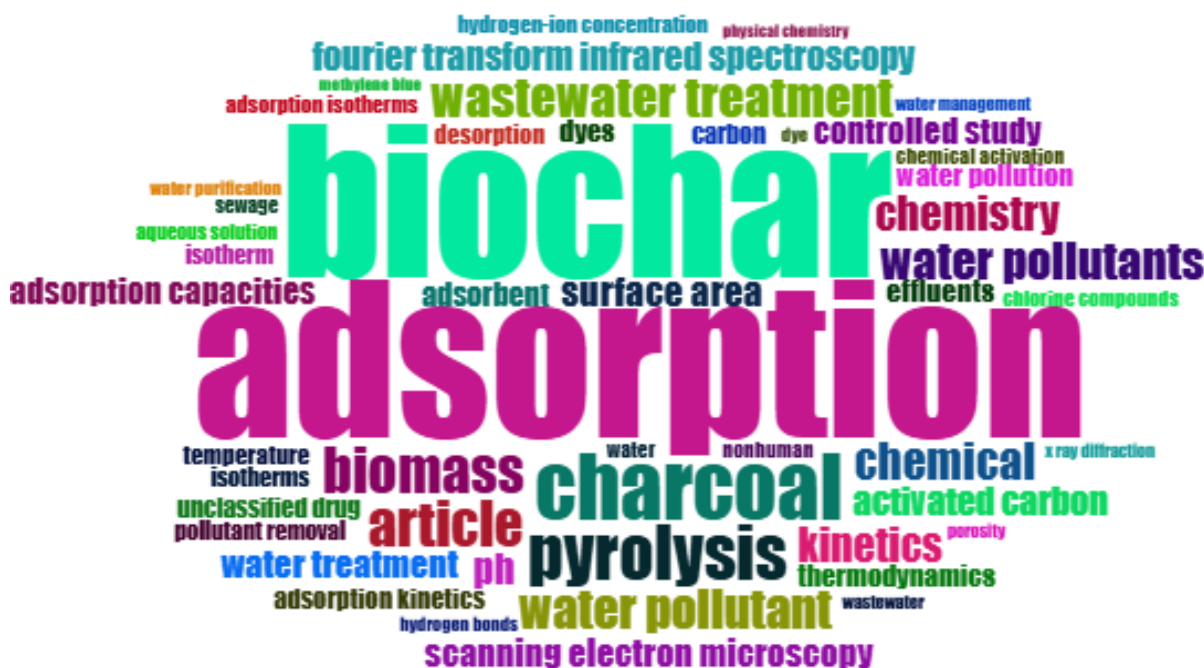
Tabela 5: Principais palavras-chave mais usuais.

Ranking	Palavra-chave	Frequência	Força de ligação
1	adsorption	211	3080
2	biochar	203	2840
3	charcoal	89	1939
4	pyrolysis	73	1322
5	biomass	61	984
6	article	60	1533
7	wastewater treatment	54	820
8	water pollutant	53	1203
9	water pollutants, chemical	50	1129
10	chemistry	47	1010

Fonte: Autor (2025).

Outras palavras, como “pyrolysis”, “biomass”, “wastewater treatment” e “water pollutant”, evidenciam o foco das pesquisas na síntese e caracterização do biochar, bem como em sua aplicação na remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos de efluentes. A presença de termos como “kinetics”, “thermodynamics” e “surface area” (Figura 5) reforça o caráter experimental e analítico das investigações, direcionadas à compreensão dos mecanismos de adsorção e dos parâmetros físico-químicos que influenciam sua eficiência.





3.7 Visão geral dos estudos brasileiros sobre biochar para tratamento de águas

Os estudos brasileiros sobre o biochar aplicado ao tratamento de águas abrangem uma ampla gama de variedades entre si. Quanto a produção dos biochars, os estudos utilizam diferentes biomassas, como o bagaço de malte (Cechinel *et al.*, 2025), casca de amendoim (F. R. da Silva *et al.*, 2025; Pessoa *et al.*, 2024), lodo de esgoto (Cavali *et al.*, 2025; Kleemann *et al.*, 2025), bagaço da cana-de-açúcar (de Castro *et al.*, 2023; de Oliveira *et al.*, 2025; Souza *et al.*, 2024), resíduos de café (Benedicto *et al.*, 2024; Mendonça *et al.*, 2023; Nascimento *et al.*, 2024). A predominância de resíduos agroindustriais e urbanos reflete a forte relação da pesquisa nacional com temas de economia circular, gestão de resíduos e produção sustentável de adsorventes de baixo custo.

Quanto as rotas de produção, observou-se a predominância da pirólise (de Castro *et al.*, 2023; de Oliveira Fontoura *et al.*, 2022; Hernandez *et al.*, 2022; Pauletto *et al.*, 2021; Souza De Brito *et al.*, 2023), método mais consolidado na literatura em função da simplicidade operacional e da capacidade de gerar biochars com propriedades adequadas à adsorção. No entanto, a presença de estudo que empregam outros métodos operacionais, como a carbonização hidrotérmica convencional (de Oliveira Fontoura *et al.*, 2022; Pauletto *et al.*, 2021), carbonização co-hidrotérmica (Cavali *et al.*, 2025) e torrefação (da Silva *et al.*, 2023).

Os contaminantes investigados nos estudos analisados abrangem uma ampla variedade de classes químicas, incluindo metais pesados (de Castro *et al.*, 2023; de Lima Carvalho *et al.*, 2024; Gama *et al.*, 2024; Guilherme *et al.*, 2021; Pessôa *et al.*, 2024; Souza De Brito *et al.*, 2023), corantes orgânicos (de Oliveira *et al.*, 2025; Gamboa *et al.*, 2024; Pereira *et al.*, 2024), herbicidas (Hernandes *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2024, 2025), fármacos (da Silva *et al.*, 2024; dos Santos *et al.*, 2023; Serafim *et al.*, 2025), compostos orgânicos fenólicos (Cimirro *et al.*, 2022; Mesquita *et al.*, 2024; Pereira *et al.*, 2024). Essa diversidade de contaminante mostra que o biochar é visto pela comunidade científica brasileira como um material versátil e potencialmente aplicável no tratamento de diferentes tipos de águas e efluentes.

Além disso, embora muitos estudos empreguem o biochar não modificado como adsorvente (Consiglio Kasemodel *et al.*, 2023; Guilhen *et al.*, 2021; Hernandez *et al.*, 2022), observa-se também diversos estudos que utilizam estratégias de ativação química e física, destinadas a aumentar a área superfície, a porosidade e a densidade de grupos funcionais do material. Entre os agentes de ativação empregados destacam-se cloreto de Ferro (FeCl_3), β -ciclodextrina (Benedicto *et al.*, 2024), hidróxido de Sódio (Pereira *et al.*, 2024), hidróxido de Potássio (de Oliveira *et al.*, 2025), cloreto de níquel (II) (Mesquita *et al.*, 2024) e ácido fosfórico (da Silva *et al.*, 2024; Pessôa *et al.*, 2024; Souza De Brito *et al.*, 2023).

3.8 Tendências e perspectivas

As tendências recentes da pesquisa brasileira sobre biochar aplicado ao tratamento de águas indicam uma consolidação do tema como estratégia sustentável para mitigação da poluição hídrica e valorização de resíduos. Observa-se crescente interesse em compreender os mecanismos de adsorção, ativação química e modificação superficial do biochar, com o intuito de aprimorar sua eficiência na remoção de contaminantes emergentes, metais pesados e compostos orgânicos.

Além disso, existe um aumento das abordagens interdisciplinares, integrando técnicas de caracterização avançada e modelagem de processos. No contexto nacional, destaca-se a busca por matérias-primas regionais, como resíduos agrícolas e urbanos, reforçando o potencial de aplicação do biochar em soluções ambientalmente adequadas e economicamente viáveis.

Em termos de perspectivas, recomenda-se que novas pesquisas explorem estratégias para a reutilização segura e eficaz do biochar após seu uso no tratamento de águas,

assegurando uma disposição final ambientalmente adequada (Dai *et al.*, 2019). Estudos voltados à avaliação da eficiência do biochar na remoção simultânea de múltiplos contaminantes, provenientes de diferentes origens, também são necessários, pois representam condições mais próximas da realidade de sistemas de tratamentos de efluentes (Ajiboye *et al.*, 2021; N. Wang *et al.*, 2025).

Além disso, destaca-se a importância de investigações que utilizem águas residuais de origem industrial e de esgotamento sanitário urbano, de modo a ampliar a aplicabilidade prática dos resultados (Y. Wang *et al.*, 2024). Outro campo promisso consiste na integração do biochar modificados com outros métodos de tratamentos de águas, como tratamentos microbianos ou físico-químicos combinados (Niu *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2025), o que pode potencializar a eficiência global do tratamento e promover soluções mais sustentáveis e inovadoras para o contexto brasileiro.

4 Considerações finais

Esta revisão apresenta uma análise bibliométrica sobre a utilização do biochar no tratamento de águas, destacando a crescente expansão da produção científica brasileira nessa área de pesquisa. A partir do conjunto de estudos selecionados, observou-se um aumento expressivo das publicações nacionais ao longo dos últimos 15 anos, refletindo o fortalecimento do interesse acadêmico e o avanço da comunidade científica no país. Além disso, o estudo evidencia a evolução da área em termos de autoria, contribuições para periódicos e redes de colaboração, tanto em âmbito nacional quanto internacional.

Outro aspecto relevante é que os trabalhos desenvolvidos possuem caráter interdisciplinar, abrangendo diferentes áreas do conhecimento, como ciências ambientais, engenharia química, químicas, energias, entre outras. As publicações são frequentemente publicadas em periódicos de alto impacto (Q1), como Environmental science and pollution research, Journal of environmental chemical engineering e o Science of the total environment. Além disso, o estudo mostrou uma rede colaborativa significativa entre pesquisadores brasileiros e internacionais, especialmente com pesquisadores da Arabia Saudita, Colômbia e Suíça, indicando a crescente inserção e visibilidade do Brasil no cenário científico global relacionado ao uso do biochar para tratamento de águas.

Olhando para o futuro, o uso do biochar como material adsorvente de baixo custo apresenta perspectivas promissoras. No entanto, ainda existem desafios importantes

relacionados à sua aplicação em larga escala, incluindo limitações relacionadas à eficiência dos processos de regeneração, ao descarte ambientalmente seguro do material após o uso e à compreensão da sinergia envolvida na adsorção simultânea de múltiplos contaminantes. Superar essas barreiras será fundamental para consolidar o potencial do biochar como uma tecnologia sustentável e eficaz para a remediação de águas.

Referências bibliográficas

- Ajiboye, T. O., Oyewo, O. A., & Onwudiwe, D. C. (2021). Simultaneous removal of organics and heavy metals from industrial wastewater: A review. **Chemosphere**, 262, 128379. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.128379>
- Barquilha, C. E. R., & Braga, M. C. B. (2021). Adsorption of organic and inorganic pollutants onto biochars: Challenges, operating conditions, and mechanisms. **Bioresource Technology Reports**, 15, 100728. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2021.100728>
- Barquilha, C. E. R., & Braga, M. C. B. (2021). Adsorption of organic and inorganic pollutants onto biochars: Challenges, operating conditions, and mechanisms. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100728. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2021.100728>
- Bilias, F., Kalderis, D., Richardson, C., Barbayiannis, N., & Gasparatos, D. (2023). Biochar application as a soil potassium management strategy: A review. **Science of The Total Environment**, 858, 159782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159782>
- Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2022). Constructed Wetlands for Reclamation and Reuse of Wastewater and Urban Stormwater: A Review. **Frontiers in Environmental Science**, 10, 836289. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2022.836289>
- Cavali, M., Kim, B., Tedoldi, D., Benbelkacem, H., Bayard, R., Garnier, V., Libardi, N., Woiciechowski, A. L., & Borges de Castilhos, A. (2025). Hydrochar from sawdust and sewage sludge—a potential media for retaining heavy metals in sustainable drainage systems (SuDS). **Environmental Technology**, 46(11), 1922–1932. <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2411066>
- Cechinel, M. A. P., Rocha, L. F., Padoin, N., & Soares, C. (2025). Dual functionality of malt bagasse-based carbonaceous material for obtaining carbon dots and adsorbent: removing and detecting tetracycline. **Environmental Science and Pollution Research** 2025 32:19, 32(19), 11950–11971. <https://doi.org/10.1007/S11356-025-36409-0>
- Cimirro, N. F. G. M., Lima, E. C., Cunha, M. R., Thue, P. S., Grimm, A., dos Reis, G. S., Rabiee, N., Saeb, M. R., Keivanimehr, F., & Habibzadeh, S. (2022). Removal of diphenols using pine biochar. Kinetics, equilibrium, thermodynamics, and mechanism of uptake. **Journal of Molecular Liquids**, 364, 119979. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2022.119979>
- Consiglio Kasemodel, M., Romão, E. L., & Bueno Ruiz Papa, T. (2023). Adsorption of methylene blue on babassu coconut (*Orbignya speciosa*) mesocarp commercial biochar. **International Journal of Environmental Science and Technology** 2023 21:2, 21(2), 1671–1682. <https://doi.org/10.1007/S13762-023-05066-6>

- da Silva, C. H., de Araújo, T. P., de Souza, A. T., Scaliante, M. H. N. O., & Martins Moreira, W. (2024). Synthesis of Activated Biochar from the Bark of *Moringa oleifera* for Adsorption of the Drug Metronidazole Present in Aqueous Medium. **Processes** 2024, Vol. 12, Page 560, 12(3), 560. <https://doi.org/10.3390/PR12030560>
- da Silva, F. R., de Mello, B. S., Rodrigues, B. C. G., Ribeiro, C. A., & Sarti, A. (2025). Biochar from lignocellulosic waste as a sustainable alternative to anthracite carbon in water treatment. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 2025 150:5, 150(5), 3237–3252. <https://doi.org/10.1007/S10973-024-13934-7>
- da Silva, M. A., Dias, D. dos S., Capela, J. M. V., Fertonani, I. A. P., & Ribeiro, C. A. (2023). Biochar from Pine cone (strobilus of *Pinus elliottii*) by torrefaction process: evaluation of the adsorptive and energy capacity. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 2023 148:21, 148(21), 12321–12333. <https://doi.org/10.1007/S10973-023-12461-1>
- Dai, Y., Zhang, N., Xing, C., Cui, Q., & Sun, Q. (2019). The adsorption, regeneration and engineering applications of biochar for removal organic pollutants: A review. **Chemosphere**, 223, 12–27. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.01.161>
- de Benedicto, D. F. C., Ferreira, G. M. D., & Thomasi, S. S. (2024). β -cyclodextrin-functionalized coffee husk biochar for surfactant adsorption. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 701, 134921. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2024.134921>
- de Castro, A. E., Penido, E. S., Souza, T. F., Camargos, J. B., Lobato, R. L. M., Ribeiro-Soares, J., Ferreira, G. M. D., & Ferreira, G. M. D. (2023). Biochars from modified sugarcane bagasse for manganese removal from mining effluents. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 11(5), 110761. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.110761>
- de Lima Carvalho, F., dos Santos, J. P., Knani, S., Alruwaili, A., da Rosa Schio, R., Lütke, S. F., Ketzer, F., Oliveira, M. L. S., Silva, L. F. O., & Dotto, G. L. (2024). Valorization of winemaking residues as biochar for removing Ni(II) from real industrial painting process effluent in a fixed-bed column. **Environmental Science and Pollution Research** 2024 31:13, 31(13), 19294–19303. <https://doi.org/10.1007/S11356-024-32385-Z>
- de Oliveira Fontoura, C. R., Dutra, L. V., Guezgüan, S. M., Nascimento, M. A., de Oliveira, A. F., & Lopes, R. P. (2022). Optimization of one-pot H₃PO₄-activated hydrochar synthesis by Doehlert design: Characterization and application. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 168, 105775. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2022.105775>
- de Oliveira, M. A., Souza, E. S., Correia, D. V., Barros, B. S., & Barros, J. K. (2025). Biochar Derived from Sugarcane Bagasse for Adsorption of Anionic and Cationic Dyes. **Materials Research**, 28, e20250179. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2025-0179>
- Domingues, R. R., Trugilho, P. F., Silva, C. A., De Melo, I. C. N. A., Melo, L. C. A., Magriotis, Z. M., & Sánchez-Monedero, M. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PLOS ONE**, 12(5), e0176884. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0176884>
- Domingues, R. R., Trugilho, P. F., Silva, C. A., De Melo, I. C. N. A., Melo, L. C. A., Magriotis, Z. M., & Sánchez-Monedero, M. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PLOS ONE**, 12(5), e0176884. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0176884>

dos Santos, D. F., Moreira, W. M., de Araújo, T. P., Bernardo, M. M. S., de Figueiredo Ligeiro da Fonseca, I. M., Ostroski, I. C., & de Barros, M. A. S. D. (2023). Competitive adsorption of acetaminophen and caffeine onto activated Tingui biochar: characterization, modeling, and mechanisms. **Environmental Science and Pollution Research** 2023 31:41, 31(41), 53611–53628. <https://doi.org/10.1007/S11356-023-31024-3>

Faisal, A., Biswal, P., Bhattacharya, D., Kumar, S., Banerjee, M., Bhowmick, G. D., & Swain, D. K. (2025). Towards sustainable aquaponics: a bibliometric analysis of trends, scientific developments, and thematic evolution. **Aquaculture International**, 33(6), 1–29. <https://doi.org/10.1007/S10499-025-02100-X>

Gama, B. M. V., Santos, J. H. L., Nascimento, G. E. do, Novais, M. E. D., Campos, N. F., Freitas, R. A. de, M. Rodríguez-Díaz, J., Sales, D. C. S., Barbosa, C. M. B. M., & Duarte, M. M. B. (2024). Adsorption of cadmium and copper using biochar obtained from the residue of the second-generation ethanol production: kinetics and equilibrium study. **Chemical Engineering Communications**, 211(7), 961–973. <https://doi.org/10.1080/00986445.2024.2316610>

Gamboa, D. M. P., Abatal, M., Lima, E., Franseschi, F. A., Ucán, C. A., Tariq, R., Elías, M. A. R., & Vargas, J. (2024). Sorption Behavior of Azo Dye Congo Red onto Activated Biochar from Haematoxylum campechianum Waste: Gradient Boosting Machine Learning-Assisted Bayesian Optimization for Improved Adsorption Process. **International Journal of Molecular Sciences** 2024, Vol. 25, Page 4771, 25(9), 4771. <https://doi.org/10.3390/IJMS25094771>

Guilhen, S. N., Rovani, S., Araujo, L. G. de, Tenório, J. A. S., & Mašek, O. (2021). Uranium removal from aqueous solution using macauba endocarp-derived biochar: Effect of physical activation. **Environmental Pollution**, 272, 116022. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.116022>

Gwenzi, W., Chaukura, N., Noubactep, C., & Mukome, F. N. D. (2017). Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. **Journal of Environmental Management**, 197, 732–749. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.03.087>

Hernandes, P. T., Franco, D. S. P., Georgin, J., Salau, N. P. G., & Dotto, G. L. (2022). Investigation of biochar from *Cedrella fissilis* applied to the adsorption of atrazine herbicide from an aqueous medium. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 10(3), 107408. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.107408>

International Biochar Initiative. **Global Biochar Market Report 2023 – Public**. Washington, DC: International Biochar Initiative, 2023. 37 p. Disponível em: <https://biochar-international.org>. Acesso em: 12 de dezembro de 2025

Jiang, M., Qi, Y., Liu, H., & Chen, Y. (2018). The Role of Nanomaterials and Nanotechnologies in Wastewater Treatment: a Bibliometric Analysis. **Nanoscale Research Letters**, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/S11671-018-2649-4>

Kleemann, N., Igansi, A., Silveira, N., Pinto, L., Cadaval, T., Arias, J., Barbosa, S., Primel, E., & Bamberg, A. (2025). Simultaneous adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on biochar from sewage sludge. **Environmental Science and Pollution Research** 2025 32:13, 32(13), 8518–8528. <https://doi.org/10.1007/S11356-025-36255-0>

Lima, M. A., Islam, M. H., Neogi, S., Nasrin, K., Sen, A., Masood, A., David, G. S., Pathan, M. M., Olalekan, B. A., Bordin, C., & Al Mamun Hridoy, M. A. (2025). Recent advances in biochar technology for aquatic pollution control: a critical review of applications, barriers, and future opportunities. **Discover Sustainability** 2025 6:1, 6(1), 980-.

<https://doi.org/10.1007/S43621-025-01581-3>

Liu, N., Gao, R., Xiao, S., & Xue, B. (2024). Visualizing the bibliometrics of biochar research for remediation of arsenic pollution. **Journal of Environmental Management**, 349, 119513.

<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.119513>

Mari Selvam, S., & Balasubramanian, P. (2023). Emerging trends and research frontiers of biochar derived through microwave assisted pyrolysis: A scientometric review. **Bioresource Technology Reports**, 24, 101601. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2023.101601>

Meena, B. P., Yadav, D. K., Yeasin, M., Shirale, A. O., Gurav, P. P., Shinogi, K. C., Yadav, D., Babu, S., Saha, M., Lenka, S., Sarkar, A., Coumar, M. V., Patel, A., Lal, B., Jha, P., & Behera, S. K. (2025). Emerging research trends on biochar application in agriculture: A scientometric analysis. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, 12, 100166.

<https://doi.org/10.1016/J.CLCB.2025.100166>

Mendonça, M. Z. M., de Oliveira, F. M., Petroni, J. M., Lucca, B. G., da Silva, R. A. B., Cardoso, V. L., & de Melo, E. I. (2023). Biochar from coffee husks: a green electrode modifier for sensitive determination of heavy metal ions. **Journal of Applied Electrochemistry** 2023 53:7, 53(7), 1461–1471. <https://doi.org/10.1007/S10800-023-01853-8>

Mesquita, M. da S., Tanabe, E. H., & Bertuol, D. A. (2024). Adsorption of Phenol Using Eucalyptus saligna Biochar Activated with NiCl₂. **Water, Air, & Soil Pollution** 2024 235:5, 235(5), 311-. <https://doi.org/10.1007/S11270-024-07049-W>

Nascimento, N. N. R. do, Silva, A. L. M. da T., Silva, W. L., & Rodrigues, M. G. F. (2024). Valorization of coffee agro-industrial residue for biochar production: Use as adsorbent for methylene blue removal. **Desalination and Water Treatment**, 320, 100767.

<https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100767>

Niu, S., Li, C., Gao, S., Tian, J., Zhang, C., Li, L., Huang, Y., & Lyu, H. (2024). Biochar, microbes, and biochar-microbe synergistic treatment of chlorinated hydrocarbons in groundwater: a review. **Frontiers in Microbiology**, 15, 1443682.

<https://doi.org/10.3389/FMICB.2024.1443682>

Pauletto, P. S., Moreno-Pérez, J., Hernández-Hernández, L. E., Bonilla-Petriciolet, A., Dotto, G. L., & Salau, N. P. G. (2021). Novel biochar and hydrochar for the adsorption of 2-nitrophenol from aqueous solutions: An approach using the PVSDM model. **Chemosphere**, 269, 128748. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.128748>

Pereira, P. H. F., Maia, L. S., da Silva, A. I. C., Silva, B. A. R., Pinhati, F. R., de Oliveira, S. A., Rosa, D. S., & Mulinari, D. R. (2024). Prospective Life Cycle Assessment Prospective (LCA) of Activated Carbon Production, Derived from Banana Peel Waste for Methylene Blue Removal. **Adsorption** 2024 30:6, 30(6), 1081–1101. <https://doi.org/10.1007/S10450-024-00485-4>

Pessôa, N. T., Sales, D. C. S., Do Nascimento, G. E., dos Santos, J. H. L., Silva, M. N. dos S., Napoleão, D. C., Rodríguez-Díaz, J. M., & Duarte, M. M. M. B. (2024). Effective adsorption of cadmium and nickel ions in mono and bicomponent systems using eco-friendly adsorbents

prepared from peanut shells. **Environmental Research**, 247, 118220.

<https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2024.118220>

Qiu, M., Liu, L., Ling, Q., Cai, Y., Yu, S., Wang, S., Fu, D., Hu, B., & Wang, X. (2022). Biochar for the removal of contaminants from soil and water: a review. **Biochar**, 4(1), 1–25.

<https://doi.org/10.1007/S42773-022-00146-1>

Rangabhashiyam, S., Lins, P. V. dos S., Oliveira, L. M. T. de M., Sepulveda, P., Ighalo, J. O., Rajapaksha, A. U., & Meili, L. (2022). Sewage sludge-derived biochar for the adsorptive removal of wastewater pollutants: A critical review. *Environmental Pollution*, 293, 118581.

<https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.118581>

Serafim, N. B. V., Santos, R. K. da S., Cavalcanti, J. V. F. de L., Araujo, C. M. B. de, Nawaz, A., Manoharadas, S., Dotto, G. L., & da Motta Sobrinho, M. A. (2025). Clonazepam adsorption using biochars from Açaí endocarp and gasification of wood waste: a comparative study. **Chemical Engineering Communications**.

<https://doi.org/10.1080/00986445.2025.2548424>

Shetty, S., Varadavenkatesan, T., Selvaraj, R., & Vinayagam, R. (2025). A bibliometric analysis of chlorpyrifos adsorption research: global trends, knowledge gaps, and future perspectives. **Discover Applied Sciences**, 7(7). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07228-2>.

Sophia A., C., & Lima, E. C. (2018). Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 150, 1–17.

<https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2017.12.026>

Sophia A., C., & Lima, E. C. (2018). Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150, 1–17.

<https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2017.12.026>

Souza De Brito, I. S., Nascentes, C. C., Pinto, P. S., Ferreira de Paula, F. G., & Teixeira, A. P. de C. (2023). Low temperature sulfonated biochar from Macauba's endocarp for lead adsorption from wastewater. **Next Materials**, 1(3), 100028.

<https://doi.org/10.1016/J.NXMATE.2023.100028>

Souza, T. F., Lobato, R. L. M., Camargos, J. B., Ferreira, G. M. D., Ribeiro-Soares, J., & Ferreira, G. M. D. (2024). Influence of Mn precursor on pre-pyrolysis modification of sugarcane bagasse biochar for enhanced removal of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid from aqueous solutions: Experimental and theoretical insights. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 12(5), 113499. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.113499>

Souza, T. F., Lobato, R. L. M., Maia, L. C., Louzada, L. N., Faria, M. E. A., Fernandes, L. F., Gurgel, L. V. A., Ferreira, G. M. D., Ribeiro-Soares, J., & Ferreira, G. M. D. (2025). Biochar-Iron Oxide Composites for Adsorption of Chlorophenoxy Herbicides: Impact of Chlorine Substituents on Batch and Continuous Adsorption Performance. **Advanced Sustainable Systems**, e00628. <https://doi.org/10.1002/ADSU.202500628>

Tran, H. N., Tomul, F., Thi Hoang Ha, N., Nguyen, D. T., Lima, E. C., Le, G. T., Chang, C. T., Masindi, V., & Woo, S. H. (2020). Innovative spherical biochar for pharmaceutical removal from water: Insight into adsorption mechanism. **Journal of Hazardous Materials**, 394, 122255. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.122255>.

Tran, H. N., Tomul, F., Thi Hoang Ha, N., Nguyen, D. T., Lima, E. C., Le, G. T., Chang, C. T., Masindi, V., & Woo, S. H. (2020). Innovative spherical biochar for pharmaceutical

removal from water: Insight into adsorption mechanism. **Journal of Hazardous Materials**, 394, 122255. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.122255>

Vinayagam, R., Varadavenkatesan, T., & Selvaraj, R. (2025). Tetracycline adsorption research (2015–2025): A bibliometric analysis of trends, challenges, and future directions. **Results in Engineering**, 27. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106383>

Wang, N., Wang, B., Wang, H., Wu, P., Hassan, M., Wang, S., & Zhang, X. (2025). Engineered biochar for simultaneous removal of heavy metals and organic pollutants from wastewater: mechanisms, efficiency, and applications. **Biochar X1**: e008.

Wang, Y., Chen, L., Zhu, Y., Fang, W., Tan, Y., He, Z., & Liao, H. (2024). Research status, trends, and mechanisms of biochar adsorption for wastewater treatment: a scientometric review. **Environmental Sciences Europe** 2024 36:1, 36(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/S12302-024-00859-Z>

Wu, H., Huo, Y., Qi, F., Zhang, Y., Li, R., & Qiao, M. (2025). Biochar-supported microbial systems: a strategy for remediation of persistent organic pollutants. **Biochar** 2025 7:1, 7(1), 113-. <https://doi.org/10.1007/S42773-025-00506-7>

Xu, T., Du, M., Yan, Y., & Singh, S. (2025). Wood-derived biochar for sustainable water remediation: insights into modification techniques, adsorption performance, techno-economic aspects, and future outlook. **Journal of Molecular Structure**, 1346, 143141. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2025.143141>

Xu, T., Gao, R., Yan, Y., Fang, J., & Ding, S. (2025). Application of modified biochar in constructed wetlands for efficient livestock wastewater treatment. **Environmental Research**, 286, 122917. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2025.122917>