



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO PARA REMOÇÃO DE POLUENTES

Matheus Alves Fernandes
Orientadora: Professora Dra. Juliana De Souza Ferreira

Universidade Federal de Uberlândia
2026



PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO PARA REMOÇÃO DE POLUENTES

Matheus Alves Fernandes

Orientadora: **Profª. Drª. Juliana De Souza Ferreira**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito para a defesa do
Trabalho de Conclusão de Curso da
Faculdade de Engenharia Química.

Matheus Alves Fernandes

PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO PARA REMOÇÃO DE POLUENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof. Dra. Juliana De Souza Ferreira.

Banca Examinadora:

Uberlândia, 04 de agosto de 2026

Prof. Rafael Bruno Vieira
Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia - MG

Prof.
Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia – MG

Uberlândia - MG

2026

RESUMO

A intensificação das atividades industriais, agrícolas e urbanas tem contribuído significativamente para o aumento da contaminação dos recursos hídricos por diferentes classes de poluentes, como metais pesados, corantes, pesticidas, fármacos e compostos orgânicos persistentes. Os contaminantes comprometem a qualidade da água, afetam os ecossistemas aquáticos e representam riscos à saúde humana, tornando indispensável o desenvolvimento de tecnologias eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis para o tratamento de águas e efluentes. O biocarvão destaca-se como um material promissor devido à sua elevada área superficial, alta porosidade, abundância de grupos funcionais e possibilidade de produção a partir de resíduos orgânicos de origem agrícola, florestal, agroindustrial e animal, ao apresentar elevada capacidade de adsorção, o biocarvão contribui para a valorização de resíduos e para a implementação dos princípios da economia circular. Este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a produção e aplicação do biocarvão na remoção de contaminantes presentes em recursos hídricos. As pesquisas analisadas demonstraram que as propriedades do biocarvão são influenciadas principalmente pela matéria-prima utilizada, pelas condições de pirólise e pelos processos de ativação química ou física, fatores que determinam sua capacidade adsorvente e sua aplicação em diferentes sistemas de tratamento. Entre as biomassas avaliadas, o biocarvão produzido a partir do ouriço da castanha-do-pará apresentou resultados promissores, evidenciando elevada eficiência de adsorção e potencial para utilização como suporte catalítico em processos oxidativos avançados. Conclui-se que o biocarvão representa uma alternativa sustentável e tecnicamente viável para o tratamento de águas contaminadas, associando elevada eficiência de remoção de poluentes ao aproveitamento de resíduos orgânicos, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos, para a redução dos impactos ambientais e para o desenvolvimento de tecnologias alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

Palavras-chave: Biocarvão; adsorção; tratamento de efluentes; recursos hídricos; contaminantes ambientais.

ABSTRACT

The increasing intensification of industrial, agricultural, and urban activities has significantly contributed to the contamination of water resources by different classes of pollutants, including heavy metals, dyes, pesticides, pharmaceuticals, and persistent organic compounds. These contaminants compromise water quality, affect aquatic ecosystems, and pose risks to human health, making the development of efficient, sustainable, and economically viable technologies for water and wastewater treatment essential. In this context, biochar has emerged as a promising material due to its high specific surface area, high porosity, abundance of functional groups, and the possibility of being produced from agricultural, forestry, agro-industrial, and animal organic residues. In addition to its high adsorption capacity, biochar contributes to waste valorization and supports the implementation of circular economy principles. This study aimed to conduct a bibliographic review on the production and application of biochar for the removal of contaminants from water resources, analyzing the main production routes, biomass sources, adsorption mechanisms, physicochemical properties, and efficiency in water and wastewater treatment. A comparative analysis of different studies involving lignocellulosic residues, anaerobic sludge, tilapia bones, and Brazil nut shell biochar was also carried out, highlighting their applications and performance in contaminant removal. The analyzed studies demonstrated that the properties of biochar are mainly influenced by the feedstock used, pyrolysis conditions, and chemical or physical activation processes, which directly determine its adsorption capacity and suitability for different treatment systems. Among the evaluated biomasses, biochar produced from Brazil nut shells showed particularly promising results, presenting high adsorption efficiency and potential for use as a catalytic support in advanced oxidation processes. It is concluded that biochar represents a sustainable and technically viable alternative for the treatment of contaminated water, combining high pollutant removal efficiency with the valorization of organic residues, thus contributing to water resource conservation, environmental impact reduction, and the development of technologies aligned with sustainability and circular economy principles.

Keywords: Biochar; adsorption; wastewater treatment; water resources; environmental contaminants.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. OBJETIVOS	10
1.1.1. OBJETIVO GERAL	10
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. METODOLOGIA	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 MATÉRIAS-PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO	12
3.1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO TRATAMENTO DE ÁGUA...	14
3.1.2 BIOCARVÃO COMO ALTERNATIVA PROMISSORA NO TRATAMENTO DE ÁGUA	16
3.2 METODOLOGIA UTILIZADA PARA A PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO.....	17
3.3 APLICAÇÃO DO BIOCARVÃO COMO ADSORVENTE E EM PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1 Mecanismos responsáveis pela adsorção	28
4.2 Potencial do ouriço da castanha-do-pará como matéria-prima.....	31
4.3 Comparação geral entre os estudos.....	34
5. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1. INTRODUÇÃO

A expansão industrial e as atividades agrícolas intensificadas têm auxiliado na abrangência e significativa para o aumento da poluição ambiental em recursos hídricos. Os principais contaminantes encontrados estão metais pesados, corantes, pesticidas e compostos orgânicos, que representam sérios riscos à saúde humana e ao ecossistema (Souza *et al.*, 2022).

A crescente contaminação dos corpos d'água por resíduos industriais, domésticos e agrícolas tem se tornado uma das principais preocupações ambientais globais. A presença desses contaminantes interfere diretamente nos processos biogeoquímicos naturais, reduz a biodiversidade aquática e compromete o uso da água para consumo humano e, muitos desses poluentes são de difícil degradação e apresentam elevada persistência no ambiente, podendo causar efeitos cumulativos na fauna, na flora e na saúde humana (Almeida *et al.*, 2023).

A complexidade e a diversidade dos contaminantes tornam o tratamento de efluentes um desafio crescente, exigindo o desenvolvimento de novas tecnologias que aliem eficiência, sustentabilidade e baixo custo operacional (Costa *et al.*, 2023).

A presença desses contaminantes nos recursos hídricos compromete gravemente a qualidade da água, afetando tanto os ecossistemas aquáticos quanto o abastecimento humano, em muitos desses poluentes são persistentes, não se degradam facilmente e tendem a se acumular nos organismos vivos, gerando efeitos tóxicos ao longo da cadeia alimentar (Martins *et al.*, 2023).

Os métodos convencionais de tratamento de efluentes como coagulação, floculação, precipitação química e filtração muitas vezes não são eficazes na remoção completa desses compostos, especialmente quando se trata de contaminantes emergentes e metais pesados em baixas concentrações. Sendo assim, a limitação tem impulsionado a busca por novas tecnologias de tratamento que sejam mais eficientes, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis (Pereira *et al.*, 2023).

Considera-se com base nisso que o desenvolvimento de tecnologias alternativas de tratamento de efluentes torna-se fundamental para mitigar os impactos ambientais e garantir o uso sustentável dos recursos hídricos. Consequentemente, as soluções emergentes, destaca-se o uso do biocarvão, um material de origem carbonácea obtido pela pirólise de biomassa em condições controladas de temperatura e oxigênio, o material tem atraído crescente interesse da comunidade científica devido à sua elevada área superficial, alta porosidade e presença de grupos funcionais ativos, características que favorecem a adsorção de diferentes tipos de contaminantes.

Já o biocarvão apresenta baixo custo de produção e pode ser obtido a partir de resíduos agrícolas e florestais, o que o torna uma alternativa sustentável e alinhada aos princípios da economia circular (Ferreira *et al.*, 2022).

O processo de pirólise consiste na decomposição térmica de materiais orgânicos, resultando em três frações principais: biogás, bio-óleo e o resíduo sólido carbonizado, denominado biocarvão. Ocasionalmente, o processo pode ser conduzido a diferentes temperaturas e tempos de residência, fatores que influenciam diretamente a composição química, a estrutura e a área superficial do material final (Gomes *et al.*, 2024).

Consoante a isso, a ampla disponibilidade de resíduos agrícolas e florestais favorece a produção de biocarvão em diferentes regiões do país. Em Minas Gerais, por exemplo, destacam-se como principais fontes de biomassa os resíduos provenientes da produção de café, cana-de-açúcar, eucalipto e carvão vegetal, além de subprodutos agroindustriais como casca de arroz, bagaço de cana e serragem, os materiais apresentam grande potencial de aproveitamento por possuírem alto teor de carbono e ampla geração anual, o que reduz custos de obtenção e contribui para a gestão sustentável dos resíduos sólidos. A utilização dessas biomassas locais para a produção de biocarvão reforça o caráter sustentável da tecnologia e estimula a aplicação regional de práticas de economia circular e valorização de resíduos (Santos *et al.*, 2021; Mendes *et al.*, 2023)

As propriedades do biocarvão variam conforme o tipo de biomassa utilizada e as condições de produção, temperaturas mais elevadas promovem maior grau de carbonização, gerando materiais com estruturas mais aromáticas, maior estabilidade térmica e aumento da micro porosidade. As temperaturas mais baixas preservam grupos funcionais oxigenados, como hidroxilas, carboxilas e carbonilas, os quais são essenciais para a adsorção de metais pesados e compostos orgânicos polares, a escolha adequada da biomassa e das condições de pirólise é determinante para otimizar as propriedades do biocarvão conforme o tipo de contaminante alvo (Gomes *et al.*, 2024).

A eficiência do biocarvão como adsorvente pode ainda ser aprimorada por meio de modificações químicas, físicas ou pela dopagem com metais, as modificações alteram a estrutura superficial do material, aumentando sua capacidade de adsorção e seletividade. Posto isso, o biocarvões modificados com metais alcalinos, ácidos minerais ou compostos oxidantes apresentam melhor desempenho na remoção de poluentes inorgânicos e orgânicos, ampliando seu potencial de aplicação em sistemas reais de tratamento de águas e efluentes (Rodrigues *et al.*, 2023).

A adsorção destaca-se entre os métodos mais eficientes de tratamento de efluentes

devido à sua simplicidade operacional, baixo custo e elevada eficiência na remoção de diferentes contaminantes. Na interação físico-química entre o adsorvente e o adsorvato, podendo ocorrer por forças de Van der Waals, ligações de hidrogênio, complexação ou troca iônica. Em comparação a outras técnicas, como oxidação química, osmose reversa e filtração por membranas, a adsorção apresenta vantagens significativas, como menor geração de resíduos e fácil regeneração do material adsorvente (Almeida *et al.*, 2023).

Considera-se que o reconhecido potencial como adsorvente, o biocarvão também tem se destacado como matriz catalítica em diversos processos de tratamento de efluentes, especialmente em reações de oxidação avançada, a sua estrutura porosa, elevada área superficial e abundância de grupos funcionais permitem a ancoragem de metais e a criação de sítios ativos, tornando-o um suporte eficiente para catalisadores heterogêneos. Os biocarvões dopados com metais de transição, como Fe, Cu e Mn, apresentam desempenho significativo na ativação de oxidantes como peróxido de hidrogênio e persulfato, promovendo a degradação eficiente de compostos orgânicos persistentes (Almeida *et al.*, 2023).

O biocarvão pode atuar diretamente como catalisador quando modificado por tratamentos térmicos ou químicos que aprimoram sua condutividade e reatividade superficial, favorecendo reações redox e melhorando a eficiência global dos processos de remediação ambiental (Costa *et al.*, 2023). Assim, sua aplicação como catalisador ou suporte catalítico amplia significativamente seu papel no tratamento de efluentes, integrando propriedades adsorptivas e catalíticas em um único material sustentável.

O estudo da produção e aplicação do biocarvão para remoção de contaminantes contribui não apenas para o avanço científico nas áreas da engenharia química e ambiental, mas também para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e acessíveis. O entendimento de como os parâmetros de produção influenciam suas propriedades e sua eficiência como adsorvente é essencial para o aprimoramento do material e sua aplicação em escala industrial.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é, por meio de um levantamento bibliográfico, avaliar as melhores condições de produção do biocarvão obtido a partir de resíduos orgânicos para aplicação como material adsorvente na remoção de contaminantes presentes em recursos hídricos, analisando suas propriedades físico-químicas, os mecanismos de adsorção e seu potencial no tratamento sustentável de águas e efluentes.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as principais rotas de produção do biocarvão e os diferentes tipos de biomassa utilizados em sua síntese;
- Identificar os fatores que influenciam as propriedades físico-químicas do biocarvão, como temperatura de pirólise, tempo de residência e tipo de matéria-prima;
- Investigar os principais mecanismos envolvidos na remoção de contaminantes por meio do biocarvão, incluindo adsorção, troca iônica, complexação e interações superficiais;
- Avaliar a eficiência do biocarvão na remoção de contaminantes, como metais pesados, corantes e compostos orgânicos presentes em soluções aquosas;
- Analisar a influência de modificações químicas e físicas na capacidade adsorvente e catalítica do biocarvão;
- Revisar estudos recentes sobre a aplicação do biocarvão no tratamento de águas e efluentes, destacando suas vantagens, limitações e perspectivas de utilização em escala industrial;
- Compilar informações técnico-científicas que contribuam para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis voltadas ao tratamento de recursos hídricos e ao aproveitamento de resíduos orgânicos por meio da economia circular.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi caracterizado como uma revisão integrativa da literatura, modalidade que permitiu reunir, sintetizar e analisar resultados de pesquisas já publicadas acerca da produção e aplicação do biocarvão na remoção de poluentes em meio aquoso, possibilitando uma compreensão ampla e sistematizada sobre sua eficiência como material adsorvente em sistemas de tratamento de água e efluentes.

Os materiais utilizados na pesquisa compreenderam artigos científicos, dissertações, teses, monografias e revisões sistemáticas que abordaram a produção, caracterização e aplicação do biocarvão na remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos em águas residuárias. As buscas foram realizadas em bases de dados eletrônicas, como Google Acadêmico, SciELO, Periódicos CAPES e repositórios institucionais de universidades.

Para orientar o processo de busca, foram utilizadas as seguintes palavras-chave, de forma isolada ou combinadas por meio de operadores booleanos: “biocarvão”, “biochar”, “adsorção”, “remoção de poluentes”, “tratamento de água”, “águas residuárias”, “contaminantes emergentes”, “pirólise” e “adsorvente”.

Os critérios de inclusão adotados foram: publicações no período de 2010 a 2025; textos disponíveis em português e inglês; estudos que abordaram a produção e/ou aplicação do biocarvão em processos de adsorção; e trabalhos com fundamentação teórica, experimental ou aplicada ao tratamento de águas contaminadas.

Os critérios de exclusão compreenderam artigos duplicados; estudos sem relação direta com o tema proposto; publicações sem acesso completo; e pesquisas que não abordaram processos de adsorção ou tratamento de água utilizando biocarvão.

Após a seleção dos materiais, os estudos foram organizados, lidos e analisados de forma crítica, com o objetivo de identificar convergências, divergências e contribuições relevantes para a temática investigada. Em seguida, os dados foram categorizados conforme os objetivos da pesquisa, permitindo a construção de uma análise comparativa sobre os principais métodos de produção do biocarvão, sua eficiência na remoção de poluentes e os parâmetros operacionais mais utilizados, como pH, temperatura de pirólise e capacidade de adsorção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATÉRIAS-PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO

A produção de biocarvão tem despertado crescente interesse científico e tecnológico devido à sua capacidade de transformar resíduos orgânicos em materiais com elevado valor agregado e potencial aplicação ambiental.

O biocarvão é um material carbonáceo obtido a partir da conversão termoquímica de biomassas em condições limitadas ou ausentes de oxigênio, sendo amplamente estudado em processos de remediação ambiental, melhoria da qualidade do solo e tratamento de águas contaminadas. A escolha da matéria-prima utilizada em sua produção constitui um dos fatores mais importantes para a obtenção de um material com características adequadas para aplicações específicas, uma vez que as propriedades físicas, químicas e estruturais do biocarvão dependem diretamente da composição da biomassa original (Teixeira *et al.*, 2020).

As biomassas utilizadas para a produção de biocarvão são compostas predominantemente por materiais lignocelulósicos, formados por celulose, hemicelulose e lignina. Posto isso, os componentes desempenham papel fundamental na formação da estrutura porosa e na estabilidade química do biocarvão produzido. A celulose e a hemicelulose sofrem degradação térmica em temperaturas relativamente baixas durante a pirólise, enquanto a lignina apresenta maior resistência térmica, contribuindo para a formação de estruturas aromáticas mais estáveis.

As biomassas com diferentes proporções desses constituintes geram biocarvões com propriedades distintas, influenciando diretamente sua capacidade de adsorção e seu desempenho em aplicações ambientais (Trazzi *et al.*, 2018).

No contexto da sustentabilidade ambiental, a utilização de resíduos agroindustriais como matéria-prima para a produção de biocarvão representa uma alternativa promissora para a valorização de resíduos sólidos. O aproveitamento desses materiais reduz a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários ou queimadas a céu aberto, minimizando impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

A conversão desses resíduos em biocarvão promove a incorporação dos princípios da economia circular, transformando passivos ambientais em produtos de elevado valor tecnológico. Com base nisso, para Hanke *et al.* (2022), a utilização de resíduos agrícolas para produção de biocarvão tem se mostrado uma estratégia eficiente para reduzir custos de produção e ampliar a sustentabilidade dos processos de tratamento ambiental.

Já as diversas biomassas disponíveis no Brasil, o bagaço de cana-de-açúcar destaca-se

como uma das matérias-primas mais estudadas para a produção de biocarvão. O país é um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar, gerando milhões de toneladas de resíduos anualmente. O bagaço apresenta elevado teor de carbono e significativa quantidade de lignina, características que favorecem a formação de biocarvões com elevada estabilidade química e boa porosidade.

Os biocarvões produzidos a partir do bagaço de cana apresentam elevada capacidade de adsorção de metais pesados e compostos orgânicos presentes em efluentes industriais, tornando-se uma alternativa viável para aplicações ambientais de baixo custo (Fagundes *et al.*, 2025).

Considera-se que o resíduo amplamente empregado na produção de biocarvão é a casca de arroz. O Brasil figura entre os principais produtores mundiais desse cereal, gerando grandes volumes desse subproduto agrícola. A casca de arroz apresenta características peculiares devido à elevada concentração de sílica em sua composição, fator que influencia diretamente as propriedades do biocarvão obtido.

Os materiais produzidos a partir dessa biomassa geralmente apresentam alta resistência mecânica, significativa estabilidade estrutural e características favoráveis para processos de adsorção, a presença de sílica pode contribuir para aplicações catalíticas em processos oxidativos avançados, ampliando as possibilidades de utilização desse material no tratamento de contaminantes ambientais (Teixeira *et al.*, 2020).

Os resíduos provenientes da cadeia produtiva do café também possuem elevado potencial para a produção de biocarvão. Minas Gerais, maior produtor brasileiro de café, gera anualmente grandes quantidades de cascas, palhas e borras de café que podem ser utilizadas como matéria-prima. Já os resíduos apresentam composição rica em carbono orgânico e compostos aromáticos, favorecendo a obtenção de biocarvões com elevada área superficial e abundância de grupos funcionais oxigenados.

Segundo estudos recentes, biocarvões produzidos a partir de resíduos de café apresentam resultados promissores na remoção de corantes, pesticidas e metais pesados em soluções aquosas, demonstrando elevado potencial para aplicação em sistemas de tratamento de águas residuárias (Pinheiro; Carvalho, 2025).

Os resíduos florestais também constituem importantes fontes de biomassa para a produção de biocarvão, entre eles, destacam-se a serragem, os cavacos de madeira, os resíduos de poda urbana e os subprodutos da indústria madeireira. Os materiais apresentam elevado teor de lignina, o que favorece a formação de estruturas carbonáceas altamente estáveis durante a pirólise. Além disso, a ampla disponibilidade desses resíduos em diversas regiões brasileiras contribui para a redução dos custos de obtenção da matéria-prima.

Os biocarvões produzidos a partir de resíduos florestais demonstram elevada eficiência na adsorção de compostos orgânicos persistentes e contaminantes metálicos presentes em águas contaminadas (Maia *et al.*, 2023).

Dentre os resíduos florestais, a madeira de eucalipto merece destaque devido à sua ampla utilização no setor florestal brasileiro. O cultivo extensivo dessa espécie gera grandes quantidades de resíduos durante os processos de colheita, beneficiamento e produção de carvão vegetal. A elevada concentração de lignina presente no eucalipto favorece a obtenção de biocarvões com maior estabilidade química, maior teor de carbono fixo e elevada resistência à degradação ambiental, já as características tornam o biocarvão derivado de eucalipto particularmente interessante para aplicações em adsorção de contaminantes e como suporte catalítico em processos de oxidação avançada (Trazzi *et al.*, 2018).

A composição química da matéria-prima influencia diretamente as propriedades físico-químicas do biocarvão produzido, biomassas com elevado teor de lignina tendem a gerar materiais mais aromáticos e estáveis, enquanto biomassas ricas em celulose e hemicelulose favorecem a formação de estruturas mais porosas. A quantidade de minerais presentes na biomassa interfere no teor de cinzas, no pH e na capacidade de troca iônica do biocarvão, já essas características são fundamentais para determinar sua eficiência em processos de remoção de contaminantes, uma vez que influenciam diretamente os mecanismos de adsorção e interação com os poluentes presentes nos efluentes (Hanke *et al.*, 2022).

O Brasil apresenta condições extremamente favoráveis para a expansão da produção de biocarvão em escala industrial devido à elevada disponibilidade de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. O estado de Minas Gerais reúne características estratégicas por concentrar importantes cadeias produtivas ligadas ao café, à cana-de-açúcar, ao eucalipto e à agroindústria em geral, já a abundância de biomassa permite a produção de biocarvão a custos reduzidos, contribuindo simultaneamente para a gestão sustentável de resíduos e para o desenvolvimento de tecnologias ambientais voltadas ao tratamento de águas contaminadas.

A seleção adequada da matéria-prima representa uma etapa necessária para o sucesso da produção de biocarvão e para a obtenção de materiais capazes de atender às exigências cada vez maiores dos sistemas modernos de tratamento ambiental.

3.1.1 Contextualização e importância do tratamento de água

O tratamento da água é um processo fundamental para assegurar a qualidade e a segurança da água destinada ao consumo humano em escala global. Com o avanço da urbanização e o aumento populacional contínuo, a demanda por água potável tem crescido de

forma significativa, o que torna os sistemas de tratamento cada vez mais essenciais para a manutenção da saúde pública e do equilíbrio ambiental (Miller; Wang; Kim, 2021).

A água tratada é amplamente utilizada em diversas atividades, incluindo consumo humano, preparo de alimentos, higiene pessoal, limpeza doméstica, irrigação agrícola e processos industriais. Na ausência de tratamento adequado, a água pode conter microrganismos patogênicos, compostos químicos tóxicos e diversos tipos de contaminantes, representando riscos diretos à saúde humana e aos ecossistemas aquáticos (Silva; Pereira, 2020).

Os sistemas convencionais de tratamento de água geralmente envolvem etapas como coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção, que têm como objetivo reduzir a carga de contaminantes presentes. Em sistemas mais avançados, podem ser incorporadas tecnologias complementares, como adsorção, troca iônica e processos de separação por membranas, visando aumentar a eficiência na remoção de poluentes específicos (Rodrigues *et al.*, 2023).

Sobre a remoção de microrganismos, o tratamento também desempenha papel importante na eliminação de substâncias inorgânicas como ferro e manganês, que podem comprometer as características organolépticas da água, alterando seu sabor, odor e coloração, o tratamento adequado é indispensável para garantir a qualidade final da água distribuída à população (Gomes *et al.*, 2024).

Assim, está relacionado à segurança hídrica e à disponibilidade futura desse recurso. Em um cenário de crescimento populacional e mudanças climáticas, a escassez de água torna-se uma preocupação global crescente. O tratamento de efluentes contribui para a preservação dos recursos hídricos, permitindo a reutilização da água em atividades não potáveis, como irrigação agrícola e uso industrial (Martínez *et al.*, 2018).

O tratamento de água exerce uma função essencial na sociedade contemporânea, garantindo o fornecimento de água segura, promovendo a proteção ambiental e favorecendo o uso sustentável dos recursos hídricos para as gerações futuras (García *et al.*, 2017).

A contaminação de águas superficiais representa um desafio significativo para os sistemas de abastecimento, uma vez que poluentes podem infiltrar-se em aquíferos e comprometer fontes de água potável. Já esse cenário mostra a necessidade de tecnologias inovadoras para tratamento e remediação de contaminantes, capazes de complementar ou substituir métodos convencionais já existentes (Ferreira; Lima; Costa, 2021).

As consequências ambientais associadas às técnicas tradicionais de tratamento de água variam de acordo com o método utilizado e as condições operacionais. Embora existam diversas tecnologias disponíveis, muitas apresentam limitações relacionadas ao custo elevado ou à baixa

eficiência na remoção de determinados poluentes (Rodrigues *et al.*, 2023).

O surgimento de contaminantes emergentes, como fármacos, produtos de higiene pessoal e compostos desreguladores endócrinos, tem evidenciado a resistência desses compostos aos processos convencionais de tratamento, reforçando a necessidade de estratégias mais eficazes e sustentáveis (García *et al.*, 2017).

3.1.2 Biocarvão como alternativa promissora no tratamento de água

O biocarvão tem sido reconhecido como um material promissor no tratamento de água devido à sua elevada capacidade de adsorção de diferentes tipos de poluentes presentes em soluções aquosas. esse material possui potencial para revolucionar as tecnologias de purificação de água potável e de tratamento de efluentes, apresentando desempenho competitivo em relação a métodos convencionais de baixo custo (Li *et al.*, 2023; Qiu *et al.*, 2022).

De forma diversa de tecnologias tradicionais, como filtração por areia, fervura, desinfecção solar e cloração, o biocarvão se destaca por sua versatilidade e eficiência na remoção de contaminantes físicos, químicos e biológicos. além disso, trata-se de um adsorvente de baixo custo, renovável e produzido a partir de biomassa abundante, o que facilita sua aplicação em regiões com menor acesso a tecnologias avançadas de tratamento (Praveen *et al.*, 2022; Freitas *et al.*, 2021).

Enquanto métodos convencionais priorizam principalmente a eliminação de patógenos, o biocarvão apresenta maior amplitude de atuação, sendo capaz de remover também compostos orgânicos, metais pesados e outros contaminantes emergentes. dessa forma, ele se posiciona como uma tecnologia mais abrangente e eficiente para a purificação da água (Medran Rangel *et al.*, 2023; Oliveira; Barbosa; Mendonça, 2023).

Os métodos tradicionais de tratamento podem alterar características organolépticas da água ou gerar subprodutos indesejáveis, como compostos potencialmente tóxicos formados durante a cloração. em contrapartida, o uso de biocarvão tende a minimizar esses efeitos, proporcionando um tratamento mais seguro e ambientalmente equilibrado (Alsawy *et al.*, 2022; Araujo *et al.*, 2024).

A sua aplicação em sistemas de tratamento de água e efluentes, o biocarvão também apresenta benefícios quando aplicado ao solo, contribuindo para a melhoria da fertilidade e aumento da produtividade agrícola, o que reforça seu caráter multifuncional (Souza *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023).

Apesar de seu elevado potencial tecnológico, ainda existem desafios relacionados à

padronização da produção, caracterização e avaliação dos impactos ambientais e sanitários do biocarvão, o que limita sua adoção em larga escala (Qiu *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2023).

3.2 METODOLOGIA UTILIZADA PARA A PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO

A produção de biocarvão constitui uma das etapas mais importantes para a definição das propriedades físico-químicas e da eficiência do material em aplicações ambientais.

O termo biocarvão seja frequentemente utilizado de forma genérica, diversos estudos demonstram que suas características dependem diretamente da combinação entre a matéria-prima empregada e as condições operacionais adotadas durante o processo de conversão térmica. As metodologias utilizadas para sua obtenção é para interpretar seu desempenho posterior como adsorvente ou catalisador em processos de tratamento de contaminantes (Trazzi *et al.*, 2019).

A principal rota tecnológica utilizada para obtenção de biocarvão é a pirólise, definida como a decomposição térmica da biomassa em ambiente com ausência total ou limitada de oxigênio. Durante esse processo ocorre a degradação dos constituintes lignocelulósicos da biomassa, especialmente hemicelulose, celulose e lignina, resultando na formação de três frações principais: bio-óleo, gases condensáveis e não condensáveis e a fração sólida carbonácea denominada biocarvão.

Segundo Rezende *et al.* (2011), a pirólise representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento de resíduos orgânicos, contribuindo simultaneamente para a valorização de biomassa residual e mitigação das emissões de carbono.

A escolha da matéria-prima representa uma etapa decisiva na metodologia de produção. No Brasil, destacam-se resíduos agroindustriais abundantes, como bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, casca de café, resíduos de eucalipto, bagaço de laranja, casca de banana, serragem de madeira e resíduos provenientes da cadeia sucroenergética. Já as biomassas apresentam diferentes teores de lignina, celulose, minerais e cinzas, fatores que influenciam diretamente o rendimento do processo e as propriedades finais do biocarvão, especialmente área superficial, porosidade, teor de carbono fixo e grupos funcionais superficiais (Fagundes; Reis; Pincelli, 2025).

A pirólise lenta é a metodologia mais frequentemente relatada na literatura brasileira para obtenção de biocarvões destinados a aplicações ambientais, já método caracteriza-se pelo emprego de baixas taxas de aquecimento, geralmente inferiores a $20\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, temperaturas entre 300 e 700 $^{\circ}\text{C}$ e tempos prolongados de residência. Nessas condições, há favorecimento da

formação da fração sólida, proporcionando maiores rendimentos gravimétricos, o aumento gradual da temperatura promove a reorganização estrutural do carbono, conferindo maior estabilidade química ao material produzido (Trazzi *et al.*, 2019).

Já o parâmetro amplamente investigado refere-se à temperatura de carbonização, em temperaturas mais baixas tendem a preservar grupos funcionais oxigenados na superfície do biocarvão, enquanto temperaturas elevadas favorecem o aumento da aromaticidade, da área superficial específica e da microporosidade. Conforme isso, para Teixeira *et al.* (2020), ao avaliarem biocarvões produzidos a partir de casca de banana e bagaço de laranja carbonizados a 400 e 600 °C, as alterações significativas nas propriedades químicas em função da temperatura empregada, evidenciando a necessidade de adequação do protocolo de produção ao objetivo final do material.

Consequentemente, menos frequente em estudos nacionais, a pirólise rápida também tem sido investigada, já a metodologia utiliza elevadas taxas de aquecimento e reduzidos tempos de residência, priorizando a produção de bio-óleo. Com os rendimentos de biocarvão tendem a ser menores quando comparados à pirólise lenta. Ainda assim, determinados materiais produzidos por essa técnica podem apresentar estruturas altamente porosas e propriedades interessantes para aplicações específicas em adsorção (Rezende *et al.*, 2011).

A carbonização hidrotérmica constitui outra alternativa metodológica relevante, principalmente para biomassas com elevado teor de umidade, a biomassa é submetida a temperaturas moderadas em meio aquoso sob pressão autógena. A principal vantagem consiste na eliminação da necessidade de secagem prévia do resíduo, reduzindo custos energéticos. Entretanto, a aplicação dessa técnica ainda permanece limitada no contexto brasileiro quando comparada às tecnologias pirolíticas convencionais.

Após a obtenção do biocarvão, torna-se necessária sua caracterização físico-química. Entre as principais técnicas empregadas nos estudos nacionais destacam-se a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX), análise elementar CHNS, determinação da área superficial específica pelo método BET, análise imediata, potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica e determinação do ponto de carga zero (Teixeira *et al.*, 2020).

Com base nisso, para Teixeira *et al.* (2020) empregaram técnicas como FRX, determinação de pH, condutividade elétrica e avaliação do teor de cinzas para caracterização de biocarvões obtidos a partir de resíduos agroindustriais, verificando diferenças significativas entre os materiais produzidos em diferentes temperaturas. Assim, os biocarvões oriundos de

casca de banana apresentaram elevados teores de cinzas e maior alcalinidade, características potencialmente vantajosas para determinadas aplicações ambientais.

No caso do biocarvão produzido a partir da palha de cana-de-açúcar, Santos *et al.* (2018) utilizaram análises relacionadas ao rendimento gravimétrico, teor de carbono fixo e caracterização imediata do material para estabelecer as condições mais adequadas de pirólise. Os resultados que pequenas variações operacionais podem modificar significativamente as propriedades do produto final, reforçando a necessidade de padronização metodológica conforme a finalidade pretendida.

Acerca disso, à ativação do biocarvão, os procedimentos adicionais destinados ao aumento da porosidade e da capacidade adsorptiva do material. As ativações podem ocorrer por tratamentos físicos ou químicos utilizando agentes específicos, em procedimentos elevem o desempenho do biocarvão, também aumentam os custos de produção, representando um desafio para aplicações em larga escala (Trazzi *et al.*, 2019).

A escolha das condições operacionais deve considerar simultaneamente a disponibilidade da biomassa, os custos energéticos envolvidos, as características desejadas no produto final e sua aplicação específica. A remoção de contaminantes possui tendência crescente na utilização de resíduos agroindustriais abundantes associados à pirólise lenta em temperaturas intermediárias, estratégia que alia eficiência técnica, sustentabilidade e viabilidade econômica.

3.3 APLICAÇÃO DO BIOCARVÃO COMO ADSORVENTE E EM PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS

O crescente lançamento de efluentes contendo compostos orgânicos recalcitrantes, metais potencialmente tóxicos e contaminantes emergentes tem impulsionado a busca por tecnologias de tratamento mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

O biocarvão destaca-se como um material promissor devido à sua elevada disponibilidade, baixo custo de obtenção e versatilidade de aplicação, com produzido a partir da conversão termoquímica de biomassas residuais, esse material apresenta propriedades estruturais capazes de favorecer processos de adsorção e reações catalíticas destinadas à remoção de poluentes aquáticos (Rezende *et al.*, 2011).

Já as diversas aplicações ambientais, a adsorção representa uma das estratégias mais estudadas, o processo baseia-se na retenção de contaminantes na superfície do adsorvente, podendo ocorrer por mecanismos físicos ou químicos. A elevada porosidade, a presença de grupos funcionais oxigenados e a área superficial específica do biocarvão favorecem a interação

com diferentes espécies químicas, permitindo sua utilização no tratamento de águas contaminadas e efluentes industriais (Trazzi *et al.*, 2018).

A eficiência de materiais carbonáceos obtidos a partir de resíduos na remoção de corantes têxteis. Conforme os autores Cândido *et al.* (2022), ao revisarem a aplicação de nanoestruturas de carbono produzidas a partir de rejeitos, observaram elevados percentuais de remoção de corantes como azul de metileno, vermelho do Congo e outros compostos amplamente utilizados pela indústria têxtil, a transformação de resíduos em adsorventes representa uma alternativa alinhada aos princípios da economia circular.

Os corantes, o biocarvão tem sido empregado na remoção de metais potencialmente tóxicos presentes em águas contaminadas, incluindo chumbo, cádmio, cobre, zinco e níquel. A retenção desses contaminantes ocorre principalmente por mecanismos de troca iônica, complexação superficial, precipitação e atração eletrostática, a eficiência do processo depende diretamente das características físico-químicas do biocarvão, especialmente do pH superficial, teor de cinzas e composição mineralógica (Trazzi *et al.*, 2018).

A classe de contaminantes de interesse corresponde aos compostos farmacêuticos e produtos de cuidados pessoais, frequentemente denominados contaminantes emergentes, já essas substâncias apresentam elevada persistência ambiental e podem causar impactos ecotoxicológicos mesmo em baixas concentrações. Os biocarvões modificados apresentam potencial para remoção de antibióticos, anti-inflamatórios e hormônios, embora ainda existam limitações relacionadas à regeneração do adsorvente e à competição entre contaminantes presentes em matrizes reais.

Para avaliação do desempenho adsorativo, os estudos nacionais geralmente empregam ensaios em batelada, nos quais são investigadas variáveis como tempo de contato, concentração inicial do contaminante, dosagem do adsorvente, temperatura e pH da solução, também são frequentemente utilizados modelos cinéticos e isotermas de adsorção para interpretação dos mecanismos envolvidos. As técnicas físico-químicas mais relatadas incluem FTIR, MEV, DRX, análise BET, potencial de carga zero e análise elementar, utilizadas para correlacionar as propriedades do material com sua capacidade de remoção (Teixeira *et al.*, 2020).

Embora a adsorção seja eficiente, determinados contaminantes apresentam elevada estabilidade química, dificultando sua completa eliminação, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) surgem como alternativas complementares. Já os processos baseiam-se na geração de espécies altamente reativas, principalmente radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), capazes de promover a degradação de compostos orgânicos resistentes aos tratamentos convencionais (Fioreze; Santos; Schmachtenberg, 2014).

Os POAs mais investigados destacam-se os sistemas Fenton e foto-Fenton. O reagente de Fenton consiste na reação entre íons ferrosos e peróxido de hidrogênio, produzindo radicais hidroxila com elevado potencial oxidante. Já o processo foto-Fenton associa radiação luminosa ao sistema, aumentando a regeneração catalítica do ferro e potencializando a degradação dos poluentes, astais tecnologias apresentam elevada eficiência na remoção de compostos orgânicos complexos presentes em águas contaminadas.

Nos últimos anos, com o crescente interesse pela integração entre biocarvão e processos oxidativos avançados, o biocarvão pode atuar como suporte catalítico, facilitando a dispersão de metais ativos e aumentando a geração de espécies reativas. Já a associação entre adsorção e degradação química permite reduzir a saturação do material e aumentar a eficiência global do tratamento em efluentes contendo múltiplos contaminantes.

A fotocatalise heterogênea também tem recebido destaque entre as aplicações promissoras do biocarvão. A incorporação de semicondutores, como dióxido de titânio (TiO_2), à matriz carbonácea favorece a separação de cargas fotoinduzidas e amplia a degradação de compostos orgânicos

Nesse ponto, para Brito *et al.* (2015), a combinação entre materiais carbonáceos e sistemas fotocatalíticos pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para o tratamento de água.

Apesar dos resultados promissores, diversos obstáculos ainda limitam a aplicação em larga escala dessas tecnologias, com os principais desafios destacam-se a ausência de padronização na produção do biocarvão, a variabilidade das biomassas utilizadas, os custos associados à modificação química do material e a escassez de estudos em condições reais de operação. A regeneração e o destino final do biocarvão saturado permanecem como temas que demandam investigação mais aprofundada.

As tendências atuais apontam para o desenvolvimento de materiais híbridos multifuncionais capazes de combinar adsorção, catálise e fotocatalise em uma única etapa de tratamento. A utilização de resíduos agroindustriais abundantes no território brasileiro representa uma oportunidade estratégica para redução de custos e agregação de valor a subprodutos agrícolas, análises bibliométricas indicam crescimento expressivo das pesquisas envolvendo POAs associados a materiais carbonáceos, evidenciando o potencial dessa área para inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental (Santiago *et al.*, 2024).

O biocarvão apresenta elevado potencial para aplicações ambientais, tanto como adsorvente quanto como componente ativo em processos oxidativos avançados. Contudo, a consolidação dessas tecnologias depende da realização de estudos que contemplem

escalonamento operacional, avaliação econômica e validação em matrizes complexas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais estudos encontrados na literatura sobre a aplicação do biocarvão produzido a partir de diferentes biomassas no tratamento de águas e efluentes. Assim, comparados os autores, a matéria-prima utilizada, a aplicação do biocarvão e os principais resultados obtidos, permitindo identificar as biomassas de maior potencial, os contaminantes removidos e a eficiência alcançada em diferentes condições experimentais.

Tabela 1– Principais estudos sobre a aplicação do biocarvão produzido a partir de diferentes biomassas no tratamento de águas e efluentes

Autor (Ano)	Matéria-prima	Aplicação	Resultado principal
Santos (2019)	Biocarvão produzido a partir do ouricuri e compósito MgAl/HDL	Adsorção do fármaco diclofenaco de sódio em solução aquosa	O compósito apresentou remoção de aproximadamente 82% do diclofenaco, demonstrando que a incorporação de hidróxidos duplos lamelares aumenta a capacidade adsorvente do biocarvão para poluentes emergentes.
Bazarin (2020)	Biocarvão obtido de ossos de tilápia submetidos à pirólise	Adsorção de contaminantes emergentes em meio aquoso	O material apresentou elevada eficiência na remoção de contaminantes, atribuída à presença de hidroxiapatita e elevada estabilidade química, indicando potencial para tratamento de águas contaminadas.
Freitas <i>et al.</i> (2021)	Biocarvão ativado produzido a partir de lodo anaeróbio	Adsorção de contaminantes orgânicos em solução aquosa	A capacidade máxima de adsorção foi de 9,87 mg g ⁻¹ , com equilíbrio alcançado em 210 minutos. O processo foi favorecido em meio ácido e ocorreu por múltiplos mecanismos de adsorção.
Soares (2022)	Biocarvão obtido de biomassa lignocelulósica	Extração em fase sólida (SPE) para determinação de pesticidas em água	O adsorvente apresentou recuperação entre 75,9% e 117,8%, mostrando desempenho semelhante ou superior ao de adsorventes comerciais empregados em análises ambientais.
Oliveira <i>et al.</i> (2023)	Diferentes biomassas vegetais utilizadas para	Revisão sobre aplicação em águas residuárias	Os estudos demonstraram que temperaturas de pirólise entre 400 e 800 °C produzem

	produção de biocarvão		materiais com maior área superficial e que a ativação química aumenta significativamente a eficiência de adsorção dos contaminantes.
Rangel <i>et al.</i> (2023)	Biocarvões produzidos a partir de diferentes resíduos agrícolas e florestais	Remoção de contaminantes emergentes em águas contaminadas	Os trabalhos analisados apresentaram eficiências de remoção entre 70% e 90%, principalmente para fármacos, corantes e pesticidas, evidenciando o potencial do biocarvão como adsorvente sustentável.
Zanona <i>et al.</i> (2023)	Biocarvão produzido a partir de lodo de esgoto	Remoção de matéria orgânica recalcitrante presente em lixiviado de aterro sanitário	O material promoveu remoção entre 60% e 85% da matéria orgânica, reduzindo significativamente a carga poluente do lixiviado e demonstrando potencial para tratamento de efluentes complexos.
Silva (2023)	Biocarvão produzido a partir de resíduos lignocelulósicos	Adsorção de contaminantes em soluções aquosas	O biocarvão apresentou elevada capacidade adsorvente devido à alta porosidade e à presença de grupos funcionais superficiais, sendo eficiente na remoção de diferentes compostos orgânicos.
Vasconcelos (2025)	Biocarvão obtido por diferentes rotas de pirólise	Remoção de poluentes emergentes em águas contaminadas	As diferentes rotas de produção influenciaram diretamente a eficiência do material, sendo observadas remoções superiores a 80% para diversos contaminantes em condições otimizadas.
Silva <i>et al.</i> (2023)	Biocarvão produzido a partir do ouriço (casca) da castanha-do-pará	Adsorção do corante azul de metileno e suporte catalítico para processos oxidativos	O biocarvão apresentou remoção superior a 90% do corante, elevada área superficial e grande estabilidade estrutural após ativação química, demonstrando elevado potencial para adsorção e como suporte catalítico em processos de tratamento de águas.

Fonte: Autoria Própria (2026)

A análise dos estudos apresentados na Tabela 1 mostra que o desempenho do biocarvão como material adsorvente está diretamente relacionado à biomassa utilizada, às condições de produção e às modificações aplicadas ao material. Apesar das diferentes metodologias

empregadas pelos autores, observa-se consenso quanto ao elevado potencial do biocarvão para remoção de contaminantes presentes em recursos hídricos, destacando-se sua elevada área superficial, porosidade e diversidade de grupos funcionais capazes de ajudar diferentes mecanismos de adsorção.

Os resultados mostram que o tipo de biomassa exerce influência significativa sobre as propriedades físico-químicas do biocarvão e, conseqüentemente, sobre sua eficiência no tratamento de águas contaminadas. As biomassas lignocelulósicas, provenientes de resíduos agrícolas e florestais, como serragem, casca de arroz, resíduos vegetais e ouricuri, apresentam elevado teor de carbono e boa formação de microporos durante a pirólise, as características favorecem a adsorção de compostos orgânicos, corantes e alguns metais pesados.

Segundo Santos (2019) demonstra esse comportamento ao produzir um compósito formado por biocarvão de ouricuri associado a hidróxidos duplos lamelares (MgAl/HDL). O material apresentou aproximadamente 82% de remoção do diclofenaco de sódio, indicando que a associação entre biocarvão e outros materiais adsorventes aumenta significativamente a eficiência de remoção de contaminantes emergentes. Em outra face, biomassas de origem animal apresentam características distintas, para Bazarin (2020) utilizou biocarvão produzido a partir de ossos de tilápia, cuja composição rica em hidroxiapatita proporciona elevada afinidade por diversos contaminantes, o autor não apresenta um único valor de remoção, os resultados evidenciam elevada eficiência na adsorção de poluentes emergentes, demonstrando que materiais de origem animal podem apresentar desempenho superior em determinadas aplicações quando comparados aos biocarvões vegetais.

Sobre a matéria-prima, os estudos demonstram que as condições de pirólise exercem influência direta sobre as propriedades estruturais do biocarvão. Assim sendo, para Oliveira *et al.* (2023), temperaturas entre 400 °C e 800 °C favorecem o desenvolvimento de materiais com maior área superficial, maior volume de microporos e maior estabilidade estrutural, as temperaturas muito elevadas podem reduzir a quantidade de grupos funcionais oxigenados presentes na superfície do material, que são importantes para processos de troca iônica e complexação.

Já para Vasconcelos (2025) reforça essa observação ao demonstrar que diferentes rotas de produção resultam em eficiências distintas de adsorção, alcançando valores superiores a 80% em determinadas condições experimentais, confirmam que a otimização das condições de pirólise representa um dos principais fatores para obtenção de biocarvões com alto desempenho.

Com base nisso, para Oliveira *et al.* (2023) destacam que processos de ativação química aumentam significativamente a área superficial e a quantidade de sítios ativos disponíveis para

adsorção, tornando os materiais mais eficientes no tratamento de águas contaminadas. A diversidade de biomassas empregadas na produção do biocarvão resulta em materiais com características estruturais e químicas distintas, possibilitando sua aplicação na remoção de uma ampla variedade de contaminantes presentes em recursos hídricos, esses contaminantes destacam-se metais pesados, corantes sintéticos, pesticidas, fármacos, matéria orgânica dissolvida e compostos classificados como contaminantes emergentes, cuja presença nos corpos d'água representa um desafio crescente para os sistemas convencionais de tratamento.

Consoante a isso, para Almeida *et al.* (2023), a combinação entre elevada área superficial, alta porosidade e abundância de grupos funcionais torna o biocarvão um adsorvente altamente eficiente, permitindo sua aplicação em diferentes etapas do tratamento de águas contaminadas.

A elevada versatilidade do biocarvão pode ser observada na variedade de aplicações descritas pelos autores analisados, direcionam sua utilização para remoção de compostos orgânicos específicos, outros demonstram sua eficiência em sistemas complexos de tratamento de efluentes industriais, agrícolas e urbanos. A diversidade confirma que o desempenho do material não está restrito a um único tipo de poluente, mas depende principalmente da interação entre as propriedades do adsorvente e as características físico-químicas do contaminante.

Conforme destacado por Costa *et al.* (2023), a possibilidade de ajustar as propriedades do biocarvão por meio da escolha da biomassa, da temperatura de pirólise e de processos de ativação permite produzir materiais direcionados para diferentes aplicações ambientais, ampliando significativamente seu potencial tecnológico.

Os contaminantes estudados, os fármacos representam uma das classes de maior preocupação ambiental devido à crescente detecção dessas substâncias em rios, lagos e estações de tratamento de esgoto, já os compostos como anti-inflamatórios, antibióticos e analgésicos apresentam elevada estabilidade química e baixa biodegradabilidade, dificultando sua remoção pelos tratamentos convencionais. Com base nisso, para Santos (2019) demonstrou que o compósito produzido a partir de biocarvão de ouricuri associado a hidróxidos duplos lamelares apresentou remoção aproximada de 82% do diclofenaco de sódio, mostra que modificações estruturais podem aumentar significativamente a eficiência do material na adsorção de poluentes emergentes.

Já para Rodrigues *et al.* (2023), que destacam que modificações químicas na superfície do biocarvão promovem aumento da área superficial, da quantidade de sítios ativos e da seletividade pelos contaminantes, favorecendo a remoção de compostos farmacêuticos presentes em baixas concentrações.

Sobre os contaminantes amplamente estudado corresponde aos pesticidas, substâncias amplamente utilizadas na agricultura e frequentemente encontradas em águas superficiais e subterrâneas devido ao escoamento superficial e à infiltração no solo, já os compostos apresentam elevada persistência ambiental e potencial de bioacumulação, tornando necessária a busca por tecnologias capazes de removê-los de forma eficiente. Considera-se Soares (2022) demonstrou que o biocarvão utilizado como adsorvente em sistemas de extração em fase sólida apresentou recuperação entre 75,9% e 117,8% para diferentes pesticidas em amostras de água, desempenho considerado semelhante ou até superior ao obtido com materiais adsorventes comerciais.

Frente a isso, não apenas o potencial do biocarvão para processos de tratamento, mas também sua aplicação em técnicas analíticas destinadas ao monitoramento ambiental. Segundo Pereira *et al.* (2023), materiais carbonáceos produzidos a partir de resíduos agrícolas apresentam grande afinidade por compostos orgânicos hidrofóbicos, favorecendo a adsorção de pesticidas por meio de interações hidrofóbicas e ligações π - π entre a superfície do adsorvente e as moléculas do contaminante.

Os resultados bastante expressivos para o tratamento de efluentes complexos, como lixiviados de aterros sanitários e águas residuárias industriais, as matrizes apresentam elevada carga orgânica, presença de compostos recalcitrantes e grande diversidade de contaminantes, tornando seu tratamento um desafio para processos convencionais. Já para Zanona *et al.* (2023) verificaram que o biocarvão produzido a partir de lodo de esgoto promoveu remoções entre 60% e 85% da matéria orgânica recalcitrante presente em lixiviados, reduzindo significativamente a carga poluidora do efluente.

Os autores ressaltam que o elevado desempenho está associado à estrutura altamente porosa do material e à presença de grupos funcionais capazes de promover múltiplos mecanismos de adsorção, os resultados estão em consonância com Oliveira *et al.* (2023), que afirmam que o biocarvão apresenta elevada eficiência na remoção de matéria orgânica dissolvida, especialmente quando produzido sob condições controladas de pirólise e submetido a processos de ativação química.

Acerca da remoção de compostos orgânicos, diversos estudos apontam a elevada eficiência do biocarvão na adsorção de metais pesados, como chumbo, cádmio, cobre e zinco, considerados contaminantes prioritários devido à sua toxicidade, persistência ambiental e capacidade de bioacumulação. As biomassas lignocelulósicas apresentam elevada capacidade para remoção desses íons metálicos devido à presença de grupos carboxílicos, hidroxilas e carbonilas em sua superfície, pois para Gomes *et al.* (2024), esses grupos funcionais favorecem

mecanismos de troca iônica e complexação superficial, permitindo elevada retenção de metais dissolvidos. Já para Almeida *et al.* (2023) acrescentam que temperaturas moderadas de pirólise preservam maior quantidade desses grupos funcionais, contribuindo para o aumento da eficiência adsorvente em relação aos metais pesados.

Ao emprego do biocarvão como suporte catalítico em processos oxidativos avançados, de forma diversa da adsorção convencional, nesses sistemas o material não apenas retém os contaminantes, mas também participa da degradação química de compostos orgânicos persistentes por meio da ativação de agentes oxidantes, como peróxido de hidrogênio e persulfato. Conforme destacado por Costa *et al.* (2023), a elevada área superficial e a estabilidade estrutural do biocarvão permitem a incorporação de metais de transição, formando catalisadores heterogêneos capazes de promover reações de oxidação altamente eficientes.

Em outra face, Rodrigues *et al.* (2023) complementam que biocarvões modificados com ferro, manganês ou cobre apresentam desempenho significativamente superior na degradação de corantes e fármacos quando comparados aos materiais não modificados, ampliando as possibilidades de aplicação do biocarvão em tecnologias avançadas de tratamento de efluentes.

A crescente valorização de resíduos agrícolas e agroindustriais como matéria-prima para produção de biocarvão. A utilização de biomassas residuais reduz os custos de produção do adsorvente e contribui para a destinação ambientalmente adequada desses materiais, promovendo simultaneamente o tratamento de resíduos sólidos e a produção de insumos para remediação ambiental. Em Minas Gerais, os resíduos provenientes da cultura do café, da cana-de-açúcar, do eucalipto, da serragem e da casca de arroz apresentam elevado potencial para produção de biocarvão, conforme destacado por Mendes *et al.* (2023).

Os resíduos oriundos da região amazônica, como o ouriço da castanha-do-pará, vêm despertando crescente interesse científico devido ao elevado teor de carbono e às excelentes propriedades estruturais obtidas após o processo de pirólise (Santos *et al.*, 2021).

De maneira geral, a análise dos estudos demonstra que o biocarvão apresenta ampla versatilidade de aplicação no tratamento de águas e efluentes, podendo atuar tanto como adsorvente quanto como suporte catalítico em diferentes tecnologias de remediação ambiental. A elevada eficiência observada para diferentes classes de contaminantes confirma que esse material constitui uma alternativa sustentável aos adsorventes convencionais, reunindo vantagens como baixo custo, elevada disponibilidade de matéria-prima, facilidade de produção e possibilidade de regeneração. Entretanto, conforme ressaltam Oliveira *et al.* (2023) e Rangel *et al.* (2023), ainda são necessários estudos voltados para aplicação em escala piloto e industrial, avaliação da regeneração do material e análise da viabilidade econômica dos processos, de

modo a ampliar a utilização do biocarvão em sistemas reais de tratamento de recursos hídricos, o biocarvão como uma das principais tecnologias sustentáveis para enfrentamento dos desafios relacionados à poluição hídrica e à gestão ambiental nas próximas décadas.

4.1 Mecanismos responsáveis pela adsorção

A eficiência do biocarvão na remoção de contaminantes está diretamente relacionada aos mecanismos físico-químicos que ocorrem durante o processo de adsorção, dos materiais adsorventes convencionais, que frequentemente apresentam um único mecanismo predominante de interação com os contaminantes, o biocarvão possui uma superfície heterogênea, rica em grupos funcionais e com elevada porosidade, permitindo que diferentes mecanismos atuem simultaneamente.

Sendo assim, as características ampliam significativamente sua capacidade de remover compostos orgânicos e inorgânicos presentes em águas e efluentes, tornando-o um dos materiais mais promissores para aplicações ambientais. Conforme destacam Almeida *et al.* (2023), a elevada eficiência do biocarvão resulta da combinação entre sua estrutura porosa, área superficial específica e composição química superficial, fatores que favorecem a adsorção de diferentes classes de poluentes.

Entre os mecanismos mais importantes destaca-se inicialmente a adsorção física (fisissorção), caracterizada pela interação entre o contaminante e a superfície do adsorvente por meio de forças intermoleculares, como as forças de Van der Waals, o mecanismo ocorre principalmente em materiais que apresentam elevada área superficial e grande volume de microporos, permitindo que um número maior de moléculas seja retido na superfície do biocarvão.

Com base nisso, Gomes *et al.* (2024), durante o processo de pirólise ocorre a formação de uma estrutura altamente porosa composta por micro, meso e macroporos, responsáveis por aumentar significativamente a área disponível para adsorção, quanto maior a área superficial do biocarvão, maior tende a ser sua capacidade de retenção de contaminantes, especialmente moléculas orgânicas de pequeno e médio porte, como corantes, pesticidas e diversos contaminantes emergentes.

Consoante a isso, é a troca iônica, responsável principalmente pela remoção de metais pesados presentes em solução aquosa, íons presentes na superfície do biocarvão são substituídos pelos íons metálicos dissolvidos na água, promovendo sua retenção no material adsorvente. A eficiência desse mecanismo está diretamente relacionada à presença de grupos funcionais

oxigenados, como carboxilas, hidroxilas e fenóis, que conferem cargas negativas à superfície do biocarvão e favorecem a interação com cátions metálicos. Conforme discutido por Rodrigues *et al.* (2023), biocarvões produzidos em temperaturas moderadas preservam maior quantidade desses grupos funcionais, aumentando significativamente sua capacidade de remoção de metais como chumbo, cádmio, cobre e zinco, torna o material especialmente interessante para tratamento de efluentes industriais contendo metais potencialmente tóxicos.

Na troca iônica, a complexação superficial constitui outro mecanismo importante para a remoção de contaminantes metálicos e compostos orgânicos polares, ocorre a formação de ligações químicas entre os grupos funcionais presentes na superfície do biocarvão e os contaminantes dissolvidos em solução, resultando na formação de complexos estáveis. Para Costa *et al.* (2023), grupos funcionais como carbonilas, carboxilas e hidroxilas apresentam elevada afinidade química por diversos metais de transição, favorecendo a retenção desses elementos na superfície do adsorvente.

As ligações de hidrogênio também desempenham papel importante na adsorção de diversos compostos orgânicos, principalmente aqueles que apresentam grupos funcionais polares em sua estrutura molecular. Compostos farmacêuticos, pesticidas e alguns corantes apresentam grupos capazes de formar ligações de hidrogênio com os grupos oxigenados presentes na superfície do biocarvão, aumentando significativamente sua retenção. Conforme Almeida *et al.* (2023), esse mecanismo torna-se particularmente relevante quando o biocarvão é produzido em temperaturas intermediárias, condição que preserva maior quantidade de grupos hidroxila e carboxila. Dessa forma, a escolha adequada das condições de pirólise influencia diretamente a eficiência do material para diferentes tipos de contaminantes.

Já a ocorrência de interações eletrostáticas, que dependem principalmente do pH da solução e da carga superficial do biocarvão. Em determinadas condições, a superfície do adsorvente pode adquirir carga positiva ou negativa, favorecendo a atração eletrostática de contaminantes com carga oposta. Segundo Freitas *et al.* (2021), o pH exerce influência significativa na eficiência da adsorção, uma vez que altera simultaneamente a carga superficial do biocarvão e o estado de ionização dos contaminantes presentes na solução. Em seus experimentos utilizando biocarvão ativado produzido a partir de lodo anaeróbico, os autores verificaram capacidade máxima de adsorção de 9,87 mg g⁻¹, sendo o melhor desempenho observado em meio ácido, condição que favoreceu as interações entre o adsorvente e os contaminantes.

Além dos mecanismos anteriormente descritos, diversos estudos destacam a importância das interações π - π , especialmente na remoção de compostos aromáticos, como

corantes sintéticos, pesticidas organoclorados e diversos fármacos, as interações ocorrem entre os anéis aromáticos presentes na estrutura carbonácea do biocarvão e as moléculas aromáticas dos contaminantes, favorecendo sua retenção na superfície do material. Em complemento, para Gomes *et al.* (2024) ressaltam que temperaturas mais elevadas de pirólise promovem maior grau de carbonização e aromatização da estrutura do biocarvão, aumentando significativamente a ocorrência dessas interações e, consequentemente, sua eficiência para adsorção de compostos orgânicos persistentes.

A eficiência da adsorção pode ser significativamente ampliada por meio de modificações químicas e físicas aplicadas ao biocarvão após sua produção, processos de ativação utilizando agentes químicos, como hidróxido de potássio, ácido fosfórico e cloreto de zinco, promovem aumento da área superficial, desenvolvimento de novos poros e incremento da quantidade de grupos funcionais ativos. Assim, Rodrigues *et al.* (2023) destacam que essas modificações aumentam consideravelmente a capacidade adsorvente do material e ampliam sua seletividade para determinados contaminantes, Costa *et al.* (2023) afirmam que a incorporação de metais como ferro, cobre e manganês transforma o biocarvão em um eficiente suporte catalítico, permitindo sua utilização em processos oxidativos avançados para degradação de compostos orgânicos persistentes.

A influencia diretamente os mecanismos de adsorção é a temperatura de pirólise empregada durante a produção do biocarvão, para Gomes *et al.* (2024), temperaturas mais baixas preservam maior quantidade de grupos funcionais oxigenados, favorecendo processos de troca iônica, ligações de hidrogênio e complexação superficial. Em contrapartida, temperaturas mais elevadas promovem maior desenvolvimento da estrutura porosa, aumento da área superficial e maior grau de aromaticidade, favorecendo principalmente a adsorção física e as interações π - π . Dessa forma, a definição das condições de produção deve considerar o tipo de contaminante que se pretende remover, permitindo a obtenção de materiais com propriedades específicas para diferentes aplicações.

Os resultados obtidos pelos estudos apresentados na Tabela 1 confirmam essa influência das características estruturais do biocarvão sobre sua eficiência adsorvente. O trabalho de Santos (2019), por exemplo, demonstrou que a associação do biocarvão de ouricuri com hidróxidos duplos lamelares aumentou significativamente a remoção de diclofenaco, enquanto Freitas *et al.* (2021) observaram elevada eficiência utilizando biocarvão ativado proveniente de lodo anaeróbio. Da mesma forma, Oliveira *et al.* (2023) verificaram, por meio de revisão sistemática, que materiais submetidos à ativação química apresentam desempenho superior em praticamente todas as aplicações analisadas, reforçando a importância das modificações

estruturais para otimização da capacidade adsorvente.

A elevada eficiência do biocarvão resulta da atuação conjunta de diversos mecanismos de adsorção, os quais ocorrem simultaneamente e são fortemente influenciados pelas características da biomassa utilizada, pelas condições de pirólise e pelos processos de ativação empregados. Essa combinação de fatores explica a capacidade do material em remover diferentes classes de contaminantes presentes em águas e efluentes, consolidando o biocarvão como um adsorvente multifuncional e altamente competitivo frente aos materiais tradicionalmente utilizados no tratamento de recursos hídricos.

4.2 Potencial do ouriço da castanha-do-pará como matéria-prima

Entre as diversas biomassas investigadas para a produção de biocarvão, o ouriço da castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*) destaca-se como uma matéria-prima com elevado potencial para aplicações ambientais, o resíduo agroflorestal é gerado em grandes quantidades durante o beneficiamento da castanha e, em muitos casos, apresenta baixo valor comercial ou é descartado inadequadamente no ambiente. O aproveitamento desse material para produção de biocarvão representa uma alternativa sustentável que associa a valorização de resíduos à obtenção de um adsorvente de elevado desempenho, contribuindo simultaneamente para a redução da geração de resíduos sólidos e para o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao tratamento de águas contaminadas. Segundo Santos et al. (2021), a utilização de resíduos lignocelulósicos abundantes para produção de biocarvão está diretamente alinhada aos princípios da economia circular, uma vez que transforma materiais considerados resíduos em produtos de alto valor agregado.

O ouriço da castanha-do-pará apresenta características físico-químicas que favorecem sua utilização como matéria-prima para obtenção de biocarvão. Sua composição é rica em lignina, celulose e hemicelulose, além de apresentar elevado teor de carbono fixo, fatores que contribuem para a formação de uma estrutura carbonácea altamente porosa durante o processo de pirólise. Conforme descrito por Gomes et al. (2024), biomassas lignocelulósicas submetidas à pirólise em temperaturas controladas desenvolvem elevada área superficial específica, maior volume de microporos e significativa estabilidade estrutural, características essenciais para materiais destinados à adsorção de contaminantes. Dessa forma, o ouriço da castanha-do-pará reúne propriedades naturais que favorecem a obtenção de biocarvões com elevado desempenho adsorvente.

Os resultados apresentados na Tabela 1 reforçam esse potencial. O estudo de Silva et al.

(2023) demonstrou que o biocarvão produzido a partir do ouriço da castanha-do-pará apresentou remoção superior a 90% do corante azul de metileno após processo de ativação química. Além da elevada eficiência de adsorção, os autores observaram aumento significativo da área superficial e do número de sítios ativos disponíveis para interação com os contaminantes. Esses resultados evidenciam que essa biomassa apresenta desempenho comparável ou superior ao observado para diversos adsorventes convencionais, demonstrando seu potencial para aplicação em sistemas de tratamento de águas e efluentes contendo compostos orgânicos.

A elevada eficiência observada está diretamente relacionada às propriedades estruturais adquiridas pelo material durante a pirólise. Conforme discutido por Almeida et al. (2023), a formação de uma rede de micro e mesoporos favorece a difusão das moléculas contaminantes para o interior da estrutura do adsorvente, aumentando o número de interações entre o poluente e os grupos funcionais presentes na superfície do biocarvão, a preservação de grupos oxigenados, como hidroxilas, carbonilas e carboxilas, possibilita a ocorrência de diferentes mecanismos de adsorção, incluindo troca iônica, ligações de hidrogênio, complexação superficial e interações eletrostáticas.

Já a possibilidade de utilização desse biocarvão como suporte catalítico em processos de oxidação avançada. De acordo com Costa et al. (2023), a estrutura carbonácea do biocarvão apresenta elevada estabilidade química e mecânica, permitindo a incorporação de metais de transição, como ferro, cobre e manganês, responsáveis pela ativação de agentes oxidantes utilizados na degradação de compostos orgânicos persistentes, o biocarvão deixa de atuar exclusivamente como adsorvente e passa a desempenhar dupla função, promovendo simultaneamente a retenção e a degradação dos contaminantes. Já para Rodrigues *et al.* (2023) acrescentam que biocarvões modificados com metais apresentam maior eficiência na degradação de corantes, pesticidas e fármacos quando comparados aos materiais não modificados, ampliando significativamente as possibilidades de aplicação desse material em tecnologias ambientais.

A utilização do ouriço da castanha-do-pará apresenta inúmeras vantagens ambientais, econômicas e sociais. A região amazônica responde por grande parte da produção nacional de castanha-do-pará, gerando anualmente grandes volumes de resíduos provenientes do processamento dos frutos. A transformação desse resíduo em biocarvão representa uma alternativa capaz de agregar valor econômico ao produto, reduzir impactos ambientais e incentivar o desenvolvimento de cadeias produtivas sustentáveis baseadas no aproveitamento integral da biomassa (Santos *et al.*, 2021; Mendes *et al.*, 2023).

A produção de biocarvão pode representar uma nova fonte de renda para pequenos produtores e cooperativas, promovendo a valorização de resíduos agroflorestais e incentivando práticas produtivas sustentáveis, para Mendes *et al.* (2023), a utilização de resíduos agrícolas e florestais como matéria-prima para produção de biocarvão reduz custos de obtenção do adsorvente, favorece a descentralização da produção e diminui a dependência de materiais comerciais utilizados nos processos de tratamento de águas.

Ao ser comparado às demais biomassas apresentadas na Tabela X, o ouriço da castanha-do-pará apresenta vantagens importantes, com biomassas de origem animal, como o biocarvão produzido a partir de ossos de tilápia, destacam-se pela elevada eficiência na remoção de contaminantes emergentes devido à presença de hidroxiapatita, enquanto resíduos provenientes de lodo anaeróbio e lodo de esgoto apresentam bons resultados para remoção de matéria orgânica em efluentes complexos (Bazarin, 2020; Freitas et al., 2021; Zanona et al., 2023). Entretanto, o ouriço da castanha-do-pará combina elevada capacidade de adsorção, disponibilidade de matéria-prima, baixo custo de produção e potencial para modificações químicas, características que ampliam significativamente suas possibilidades de aplicação. Além disso, sua origem vegetal favorece a formação de uma estrutura altamente porosa e rica em grupos funcionais, tornando-o especialmente eficiente para remoção de compostos orgânicos, corantes e metais pesados.

Apesar dos resultados promissores obtidos em escala laboratorial, a literatura aponta que ainda existem desafios relacionados à aplicação industrial do biocarvão produzido a partir do ouriço da castanha-do-pará. Oliveira et al. (2023) destacam a necessidade de estudos voltados para avaliação da regeneração do adsorvente, estabilidade estrutural após múltiplos ciclos de utilização, comportamento em sistemas contínuos de tratamento e análise da viabilidade econômica em larga escala. Além disso, pesquisas futuras devem investigar diferentes condições de pirólise, métodos de ativação e modificações superficiais capazes de aumentar ainda mais a eficiência do material para diferentes classes de contaminantes.

De forma geral, a análise dos estudos demonstra que o biocarvão produzido a partir do ouriço da castanha-do-pará representa uma das alternativas mais promissoras entre as biomassas atualmente investigadas para o tratamento de águas e efluentes. Sua elevada eficiência de adsorção, associada à abundância da matéria-prima, ao baixo custo de produção, à possibilidade de utilização como suporte catalítico e aos benefícios ambientais decorrentes do aproveitamento de resíduos agroflorestais, evidencia seu grande potencial para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de remediação ambiental. Dessa maneira, o incentivo às pesquisas envolvendo essa biomassa poderá contribuir tanto para a ampliação do

conhecimento científico quanto para o desenvolvimento de soluções tecnológicas capazes de atender às demandas atuais relacionadas à conservação dos recursos hídricos e à gestão sustentável de resíduos orgânicos.

4.3 Comparação geral entre os estudos

Na comparação entre os estudos refere-se à influência da matéria-prima sobre as propriedades do biocarvão, biomassas vegetais, especialmente resíduos lignocelulósicos, apresentaram excelente desempenho devido ao elevado teor de carbono, à formação de estruturas altamente porosas durante a pirólise e à presença de grupos funcionais capazes de interagir com diferentes contaminantes. Os resíduos provenientes de culturas agrícolas, materiais florestais e subprodutos agroindustriais demonstraram elevada eficiência na remoção de corantes, pesticidas, compostos orgânicos e metais pesados. Segundo Gomes et al. (2024), essas biomassas favorecem a formação de materiais com elevada área superficial e abundância de microporos, características fundamentais para o aumento da capacidade adsorvente.

Em contrapartida, os estudos que utilizaram biomassas de origem animal evidenciaram mecanismos de adsorção diferenciados. O trabalho desenvolvido por Bazarin (2020) demonstrou que o biocarvão produzido a partir de ossos de tilápia apresentou elevada eficiência na remoção de contaminantes emergentes, resultado atribuído principalmente à presença de hidroxiapatita e outros compostos minerais capazes de favorecer processos de troca iônica e complexação superficial. Embora os mecanismos envolvidos sejam distintos daqueles observados em biomassas vegetais, ambos os materiais apresentaram resultados expressivos, indicando que a escolha da matéria-prima deve considerar o tipo de contaminante que se pretende remover e as condições de aplicação do adsorvente.

Assim, diz respeito à influência das condições de produção, especialmente da temperatura de pirólise e dos processos de ativação. Oliveira *et al.* (2023), por meio de uma revisão sistemática, verificaram que temperaturas entre 400 °C e 800 °C favorecem a formação de biocarvões com maior área superficial e melhor desempenho adsorvente. Além disso, os autores destacam que a ativação química aumenta significativamente a eficiência do material ao promover o desenvolvimento de novos poros e ampliar a quantidade de grupos funcionais disponíveis para interação com os contaminantes, a observação também foi confirmada por Rodrigues et al. (2023), que relatam aumento expressivo da capacidade adsorvente após modificações químicas na superfície do biocarvão.

A comparação dos resultados obtidos para diferentes aplicações evidencia que o biocarvão apresenta elevado desempenho em praticamente todas as situações analisadas. No

estudo de Santos (2019), por exemplo, o compósito produzido a partir de biocarvão de ouricuri apresentou remoção aproximada de 82% do diclofenaco de sódio, enquanto Soares (2022) obteve recuperação entre 75,9% e 117,8% para pesticidas utilizando biocarvão como adsorvente em sistemas de extração em fase sólida. Por sua vez, Freitas et al. (2021) verificaram capacidade máxima de adsorção de $9,87 \text{ mg g}^{-1}$ utilizando biocarvão ativado produzido a partir de lodo anaeróbio, e Zanona et al. (2023) alcançaram remoções entre 60% e 85% da matéria orgânica presente em lixiviados de aterros sanitários.

Entre as biomassas avaliadas, merece destaque o ouriço da castanha-do-pará, que apresentou um dos resultados mais expressivos entre os estudos analisados. Conforme descrito por Silva et al. (2023), o biocarvão produzido a partir desse resíduo agroflorestal apresentou remoção superior a 90% do corante azul de metileno, além de elevada área superficial e grande estabilidade estrutural após ativação química, comparado às demais biomassas vegetais, esse material apresenta vantagens relacionadas à sua elevada disponibilidade na região amazônica, ao baixo custo de obtenção e à possibilidade de utilização tanto como adsorvente quanto como suporte catalítico.

Ao ser identificado durante a comparação refere-se à crescente tendência de utilização do biocarvão em processos integrados de tratamento, conforme Costa et al. (2023) destacam que a incorporação de metais de transição na estrutura do biocarvão amplia significativamente sua eficiência na degradação de compostos orgânicos persistentes, permitindo que o material participe não apenas da retenção, mas também da destruição química dos poluentes. Essa característica representa uma evolução importante em relação às aplicações tradicionais do biocarvão, ampliando seu potencial tecnológico para futuras aplicações industriais.

Apesar dos resultados bastante promissores observados em escala laboratorial, a literatura evidencia que ainda existem desafios para a consolidação do biocarvão em aplicações comerciais e industriais. Oliveira et al. (2023) destacam que a maioria dos estudos ainda é conduzida em escala de bancada, utilizando soluções sintéticas e condições experimentais controladas, o que dificulta a extrapolação direta dos resultados para sistemas reais de tratamento. Entre os principais desafios identificados pelos autores estão a necessidade de padronização dos métodos de produção, a avaliação da regeneração e reutilização do material, a estabilidade após sucessivos ciclos de adsorção, os custos associados aos processos de ativação e a realização de análises econômicas e ambientais em escala industrial.

Acerca disso, à necessidade de ampliar os estudos envolvendo novas biomassas regionais, especialmente aquelas disponíveis em grande quantidade e ainda pouco exploradas cientificamente, resíduos como o ouriço da castanha-do-pará, casca de café, bagaço de cana-

de-açúcar, serragem, casca de arroz e resíduos florestais apresentam elevado potencial para futuras pesquisas, principalmente em estados como Minas Gerais, onde existe ampla disponibilidade dessas matérias-primas. Conforme ressaltam Santos et al. (2021) e Mendes et al. (2023), o aproveitamento desses resíduos contribui não apenas para o desenvolvimento de novos adsorventes, mas também para o fortalecimento de cadeias produtivas sustentáveis e para a redução dos impactos ambientais relacionados à geração de resíduos sólidos.

A possibilidade de utilizar diferentes tipos de biomassa, aliada à elevada eficiência de adsorção, ao baixo custo de produção e às perspectivas de aplicação como suporte catalítico, evidencia a versatilidade desse material frente aos desafios atuais relacionados à poluição hídrica, para que essa tecnologia seja efetivamente incorporada em sistemas de tratamento em larga escala, torna-se fundamental o desenvolvimento de pesquisas voltadas à otimização dos processos de produção, ao aumento da estabilidade e regeneração do material e à validação de seu desempenho em condições reais de operação. Dessa forma, os resultados analisados nesta revisão reforçam que o biocarvão representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para contribuir com a preservação dos recursos hídricos e com o desenvolvimento de soluções inovadoras para o tratamento de efluentes.

5. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a produção e aplicação do biocarvão obtido a partir de resíduos orgânicos para remoção de contaminantes presentes em recursos hídricos, analisando os principais fatores que influenciam suas propriedades físico-químicas, os mecanismos de adsorção envolvidos e sua eficiência no tratamento de águas e efluentes. A partir da análise dos estudos selecionados, foi possível verificar que o biocarvão representa uma alternativa tecnicamente viável, ambientalmente sustentável e economicamente promissora para aplicação em processos de remediação ambiental, especialmente devido ao seu baixo custo de produção, elevada disponibilidade de matérias-primas e excelente capacidade adsorvente.

Os resultados analisados demonstraram que as características do biocarvão são fortemente influenciadas pela biomassa utilizada e pelas condições empregadas durante o processo de pirólise. Fatores como temperatura de produção, tempo de residência e métodos de ativação química ou física exercem influência direta sobre a área superficial, a porosidade, a estabilidade estrutural e a quantidade de grupos funcionais presentes na superfície do material. Essas propriedades determinam a eficiência da adsorção e permitem direcionar a produção do

biocarvão para diferentes aplicações, conforme o tipo de contaminante presente no meio aquoso.

A revisão da literatura também evidenciou que o biocarvão apresenta elevada eficiência na remoção de diferentes classes de contaminantes, incluindo metais pesados, corantes sintéticos, pesticidas, fármacos, matéria orgânica e contaminantes emergentes. Os estudos analisados demonstraram eficiências de remoção frequentemente superiores a 70%, alcançando valores acima de 90% em algumas aplicações, especialmente quando o material foi submetido a processos de ativação química ou associado a outros materiais adsorventes. Esses resultados confirmam que o biocarvão possui desempenho competitivo em relação a adsorventes comerciais, além de apresentar vantagens relacionadas à sustentabilidade e ao aproveitamento de resíduos agroindustriais.

Outro aspecto importante identificado foi a diversidade de mecanismos responsáveis pela remoção dos contaminantes. A elevada eficiência do biocarvão está relacionada à atuação simultânea de processos como adsorção física, troca iônica, ligações de hidrogênio, complexação superficial, interações eletrostáticas e interações π - π . A atuação conjunta desses mecanismos amplia significativamente a capacidade do material em remover compostos orgânicos e inorgânicos presentes em diferentes tipos de efluentes. Além disso, verificou-se que modificações químicas e estruturais aumentam a quantidade de sítios ativos disponíveis, potencializando ainda mais a capacidade adsorvente e ampliando sua aplicação em processos oxidativos avançados.

Entre as diferentes biomassas analisadas, merece destaque o ouriço da castanha-do-pará, que apresentou resultados bastante promissores para produção de biocarvão de elevado desempenho. Além da elevada eficiência na adsorção de corantes e outros compostos orgânicos, esse resíduo agroflorestral apresenta ampla disponibilidade, principalmente na região amazônica, e constitui uma alternativa sustentável para valorização de resíduos provenientes do extrativismo vegetal. O aproveitamento dessa biomassa contribui não apenas para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos, mas também para o fortalecimento da economia circular e para o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente responsáveis.

Outro ponto evidenciado ao longo desta revisão refere-se ao potencial do biocarvão como suporte catalítico em processos de tratamento de águas. Os estudos mais recentes demonstram que a incorporação de metais de transição na estrutura do biocarvão amplia sua eficiência na degradação de contaminantes persistentes por meio de processos oxidativos avançados. Dessa forma, o material deixa de atuar apenas como adsorvente, passando a exercer

funções catalíticas que aumentam significativamente sua capacidade de remoção de poluentes, ampliando suas perspectivas de aplicação em sistemas modernos de tratamento de efluentes.

Sob a perspectiva ambiental, o emprego do biocarvão apresenta vantagens relevantes ao promover o reaproveitamento de resíduos agrícolas, florestais, agroindustriais e de origem animal que, muitas vezes, não possuem destinação ambientalmente adequada. Essa característica torna essa tecnologia compatível com os princípios da economia circular, da gestão sustentável de resíduos sólidos e da utilização racional dos recursos naturais, contribuindo simultaneamente para a mitigação da poluição hídrica e para a redução dos impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada de resíduos orgânicos.

Entretanto, apesar dos resultados promissores apresentados pela literatura, verificou-se que a maior parte das pesquisas ainda se concentra em estudos realizados em escala laboratorial, utilizando soluções sintéticas e condições experimentais controladas. Dessa forma, ainda existem desafios relacionados à aplicação do biocarvão em escala industrial, especialmente quanto à padronização das condições de produção, avaliação da regeneração do adsorvente, estabilidade após sucessivos ciclos de utilização, desempenho em efluentes reais e análise da viabilidade econômica dos processos. Esses aspectos evidenciam a necessidade de ampliar os estudos em escala piloto e industrial, visando consolidar essa tecnologia como alternativa efetiva para o tratamento de águas e efluentes.

Diante do exposto, conclui-se que o biocarvão apresenta elevado potencial para se tornar uma das principais tecnologias sustentáveis destinadas ao tratamento de recursos hídricos. Sua produção a partir de resíduos orgânicos de baixo custo, associada à elevada eficiência de adsorção e às possibilidades de aplicação como suporte catalítico, demonstra que esse material reúne características capazes de atender às demandas atuais relacionadas à preservação ambiental, ao tratamento de efluentes e à valorização de resíduos sólidos. Assim, os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados, permitindo reunir informações relevantes sobre as rotas de produção do biocarvão, suas propriedades, mecanismos de atuação e aplicações ambientais.

Por fim, espera-se que esta revisão bibliográfica contribua para o avanço das pesquisas relacionadas ao uso do biocarvão como material adsorvente, incentivando o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas ao tratamento sustentável de águas contaminadas. Além disso, os resultados apresentados podem servir como base para futuros estudos experimentais, especialmente aqueles direcionados à otimização das condições de produção, ao desenvolvimento de biocarvões modificados e à utilização de novas biomassas residuais, fortalecendo a integração entre inovação tecnológica, sustentabilidade ambiental e

aproveitamento racional dos recursos naturais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. S. et al. Uso de biocarvão na remoção de metais pesados em águas contaminadas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, p. 245–255, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220230001001234>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

ALSAWY, Tariq et al. A comprehensive review on the chemical regeneration of biochar adsorbent for sustainable wastewater treatment. **npj Clean Water**, v. 5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00172-3>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41545-022-00172-3>. Acesso em: 11 jun. 2026.

ARAUJO, Rayanne O. et al. Biochar from lignocellulosic biomass: a sustainable circular economy approach for removing organic and inorganic contaminants. **Química Nova**, São Paulo, v. 47, n. 10, e20240079, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20240079>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/Mx6nyxmBznbsmGCQDcVXp4G/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

BAZARIN, Guilherme. **Biocarvão do osso de tilápia: obtenção e aplicação na remoção de poluentes emergentes**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Toledo, 2020. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/7193>. Acesso em: 11 jun. 2026.

BRITO, Chrystiane N.; ARAÚJO, Eliane G.; MARTÍNEZ-HUITLE, Carlos Alberto. Aplicação de métodos oxidativos avançados para a desinfecção de água. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 7, n. 2, p. 499-520, 2015. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/765>. Acesso em: 11 jun. 2026.

CÂNDIDO, Thaís Cristina de Oliveira; RIBEIRO, Rafaela Fernandes; MOURA, Marden Pires; TEIXEIRA, Ana Paula de Carvalho; PINTO, Paula Sevenini. Nanoestruturas de carbono a partir de rejeitos: síntese, caracterização e aplicação na adsorção de corantes. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 14, n. 4, p. 795-812, 2022. DOI: 10.21577/1984-6835.20220096. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/4441>. Acesso em: 11 jun. 2026.

COSTA, J. P. et al. Produção de biochar a partir de resíduos agroindustriais e aplicação em adsorção de contaminantes. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 18, n. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2875>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

FAGUNDES, S. O.; REIS, A. R.; PINCELLI, A. L. P. S. M. **Biocarvão: uma revisão para uso agrícola e ambiental no Brasil**. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, Piracicaba, v. 15, n. 2, 2025. Disponível em: <https://www.fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/view/556>. Acesso em: 11 jun. 2026.

FERREIRA, H. S. *et al.* Tratamento de efluentes industriais utilizando biocarvão como adsorvente. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 89–98, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220001>

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/Acesso em: 11 jun. 2026>.

FIGUEIREDO, Mariele; SANTOS, Eliane Pereira dos; SCHMACHTENBERG, Natana. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 79-91, 2014. DOI:

10.5902/2236117010662. Disponível em:

<https://periodicos.ufsm.br/index.php/reget/article/view/10662>. Acesso em: 11 jun. 2026.

FREITAS, T. K. F. S. *et al.* Biocarvão ativado produzido a partir de lodo anaeróbio de estação de tratamento de efluentes para remoção do corante tartrazina. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, e1309, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1309>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/357792141_Biocarvao_ativado_produzido_a_partir_de_lodo_anaerobio_de_estacao_de_tratamento_de_efluentes_para_remocao_do_corante_tartazina. Acesso em: 11 jun. 2026.

GOMES, T. R. *et al.* Emerging contaminants removal using biochar-based adsorbents.

Química Nova, v. 47, n. 1, p. 102–110, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170901>.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

HANKE, Daniel; NASCIMENTO, Shirley Grazieli da Silva; DICK, Deborah Pinheiro; ÁVILA, Mariana Rockenbach de; PILLON, Clenio Nailto. Produção e caracterização de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa vegetal: aproveitamento de resíduos arbóreos e agrícolas sem destinação apropriada. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 58-77, 2022. Disponível em:

<https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/1062>. Acesso em: 05 jun. 2026.

LI, Ruichenzhi *et al.* Porous biochar materials for sustainable water treatment: synthesis, modification, and application. **Water**, v. 15, n. 3, p. 395, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.3390/w15030395>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/3/395>. Acesso em: 11 jun. 2026.

MARTINS, L. F. *et al.* Aplicação de biochar na remoção de corantes têxteis em efluentes aquosos. **Química Nova**, v. 46, n. 5, p. 567–575, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170890>

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/Acesso em: 11 jun. 2026>.

MEDRAN RANGEL, Adrize *et al.* The use of biochar for removal of emerging contaminants in contaminated water. **Journal of Interdisciplinary Debates**, v. 4, n. 3, p. 62–82, 2023.

DOI: <https://doi.org/10.51249/jid.v4i03.1471> Disponível em:

<https://periodicojs.com.br/index.php/jid/article/view/1471> Acesso em: 11 jun. 2026.

OLIVEIRA, Andriele Rodrigues de; BARBOSA, Taísa Andrade; MENDONÇA, Luciana Coêlho. Adsorção de poluentes em águas residuárias utilizando biocarvão: revisão sistemática. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 12, n. 4, e23712441228, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.41228>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/41228>. Acesso em: 11 jun. 2026.

OLIVEIRA, Carlos Eduardo Machado de. Panorama e tendências da pesquisa brasileira sobre biochar no tratamento de águas: uma análise bibliométrica. **Revista Gestão & Sustentabilidade**, v. 8, n. 1, 2026. DOI: <https://doi.org/10.36661/2596-142X.2026v8n1.15303>

Disponível em: <https://periodicos.uffs.edu.br/index.php/RGES/article/view/15303>. Acesso em: 11 jun. 2026.

PEREIRA, M. T. *et al.* Enhanced adsorption of pollutants using chemically activated biochar. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110123>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/> Acesso em: 11 jun. 2026.

PRAVEEN, Saravanan et al. Biochar for removal of dyes in contaminated water: an overview. **Biochar**, v. 4, n. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00131-8> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42773-022-00131-8> Acesso em: 11 jun. 2026.

QIU, Muqing et al. Biochar for the removal of contaminants from soil and water: a review. **Biochar**, v. 4, n. 19, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00146-1> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42773-022-00146-1>. Acesso em: 11 jun. 2026.

RANGEL, Adrize Medran et al. The use of biochar for removal of emerging contaminants in contaminated water. **Journal of Interdisciplinary Debates**, v. 4, n. 3, p. 62-82, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51249/jid.v4i03.1471>. Disponível em: <https://periodicojs.com.br/index.php/jid/article/view/1471>. Acesso em: 11 jun. 2026.

REZENDE, Edivaltrys I. P.; ANGELO, Lilian C.; SANTOS, Sailer S.; MANGRICH, Antonio S. **Biocarvão (Biochar) e sequestro de carbono**. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 3, n. 5, p. 426-433, 2011. DOI: 10.5935/1984-6835.20110046. Disponível em: <https://rvq-sub.s bq.org.br/index.php/rvq/article/view/204>. Acesso em: 11 jun. 2026.

RODRIGUES, F. A. *et al.* Biochar production from waste biomass and environmental applications. **Waste Management**, v. 150, p. 120–130, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

SANTIAGO, Victor Hugo de Oliveira et al. Processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes: tendências recentes e análise bibliométrica. **Brazilian Journal of Production Engineering**, Vitória, v. 10, n. 4, p. 142-159, 2024. DOI: 10.47456/bjpe.v10i4.46204. Disponível em: <https://www.periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/46204>. Acesso em: 11 jun. 2026.

SANTOS, Grazielle Emanuella de Souza dos. **Síntese de compósitos MgAl/HDL-biocarvão de ouricuri para aplicação na remoção de poluentes emergentes**. 2019. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/4792>. Acesso em: 11 jun. 2026.

SCHELLEKENS, Judith; ALMEIDA, Bruno G.; PELLERIN, Sébastien; BUURMAN, Peter; MARTINS, Gilvan S.; VIDAL-TORRADO, Pablo. Molecular characterization of biochar from five Brazilian agricultural residues obtained at different charring temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 130, p. 132-143, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322923016_Molecular_characterization_of_biochar_from_five_Brazilian_agricultural_residues_obtained_at_different_charring_temperatures. Acesso em: 05 jun. 2026.

SILVA, Francisco Raimundo da. **Produção, caracterização e avaliação em meio aquoso de biocarvão de resíduos lignocelulósicos**. 2023. 137 f. Tese (Doutorado em Química – Área de Química Analítica) – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Araraquara, 2023. Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Sarti. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/251058>. Acesso em: 11 jun. 2026.

SOARES, Paulo Roberto Leite. **Produção de biocarvão e sua aplicação para a extração em fase sólida de pesticidas em água**. 2022. 97 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2022. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/15819>. Acesso em: 11 jun. 2026.

SOUZA, A. C. *et al.* Biochar derived from agricultural waste for removal of organic pollutants in aqueous solutions. **Química Nova**, São Paulo, v. 45, n. 3, p. 312–320, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170789> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/> Acesso em: 11 jun. 2026.

TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes; TEIXEIRA, Paulo César; LIMA, Hélio Guilherme de; OLIVEIRA, Diego Marinho de; FERNANDES, Alexandre Rodrigues. Caracterização química de amostras de biocarvão de casca de banana e bagaço de laranja carbonizados a 400 e 600 °C. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 1, p. 92-103, 2020. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/3139>. Acesso em: 05 jun. 2026.

TRAZZI, Paulo André; HIGA, Antonio; DIECKOW, Jeferson; MANGRICH, Antonio Sérgio. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326077338_BIOCARVAO_REALIDADE_E_POTENCIAL_DE_USO_NO_MEIO_FLORESTAL. Acesso em: 05 jun. 2026.

VASCONCELOS, Laryssa Plentz Gomes. **Produção de biocarvão por diferentes rotas a partir do resíduo lignocelulósico industrial visando a adsorção de poluentes emergentes**. 2025. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/16862>. Acesso em: 11 jun. 2026.

VEIGA, Tais Regina Lima Abreu; LIMA, José Tarcísio; DESSIMONI, Anelise Lima de Abreu; PEGO, Matheus Felipe Freire; SOARES, Jenaina Ribeiro; TRUGILHO, Paulo Fernando. Different plant biomasses characterization for biochar production. **Cerne**, v. 24, n. 1, p. 19-26, 2018. Disponível em: <https://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/1585>. Acesso em: 05 jun. 2026.

ZANONA, Victória Regina Celso Monteiro; BARQUILHA, Carlos Eduardo Rodrigues; BRAGA, Maria Cristina Borba. Removal of recalcitrant organic matter of landfill leachate by adsorption onto biochar from sewage sludge: a quali-quantitative analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 344, p. 118387, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118387>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37348307/>. Acesso em: 11 jun. 2026