

EFICIÊNCIA DO CARVÃO ATIVADO NA REMOÇÃO DE CORANTES ALIMENTÍCIOS EM SOLUÇÃO AQUOSA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

EFFICIENCY OF ACTIVATED CARBON IN THE REMOVAL OF FOOD DYES
FROM AQUEOUS SOLUTIONS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Ciências Agrárias • 02/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/788150661](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/788150661)

José Leal Rodrigues
Sérgio Luis Melo Viroli
Sofia Milanello de Almeida

RESUMO

A presença de corantes orgânicos em soluções aquosas representa um problema ambiental relevante, especialmente em decorrência do descarte de efluentes industriais provenientes dos setores alimentício, têxtil e químico. Esses compostos apresentam elevada estabilidade química e alta solubilidade em água, características que dificultam sua remoção por processos convencionais de tratamento e favorecem sua persistência em ambientes aquáticos. Nesse contexto, processos de adsorção utilizando carvão ativado têm sido amplamente investigados como alternativa eficiente para a remoção desses contaminantes. O presente estudo teve como objetivo analisar sistematicamente a literatura científica sobre a eficiência do carvão ativado na remoção de corantes alimentícios em solução aquosa. A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed e Google Scholar, utilizando combinações de descritores relacionados à adsorção, carvão ativado e remoção de corantes. Foram incluídos artigos originais com abordagem experimental, publicados entre 2000 e 2025, nos idiomas inglês, português ou espanhol. Após aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e análise das etapas de triagem e elegibilidade, dez estudos foram considerados adequados para análise. Os resultados indicam elevada eficiência do carvão ativado na remoção de corantes em solução aquosa, com desempenho influenciado por variáveis experimentais como pH, temperatura, concentração inicial do corante e dose do adsorvente. A análise também evidenciou o potencial de adsorventes derivados de biomassa e materiais modificados como alternativas sustentáveis para tratamento de efluentes. Conclui-se que o carvão ativado permanece como tecnologia promissora para remoção de corantes orgânicos em água, destacando-se pela eficiência, versatilidade e potencial de aplicação em sistemas de tratamento ambiental.

Palavras-chave: adsorção; carvão ativado; corantes alimentícios; tratamento de água; revisão sistemática.

ABSTRACT

The presence of organic dyes in aqueous solutions represents a significant environmental problem, particularly due to the discharge of industrial effluents from the food, textile, and chemical sectors. These compounds exhibit high chemical stability and high water solubility, characteristics that hinder their removal by conventional treatment processes and favor their persistence in aquatic environments. In this context, adsorption processes using activated carbon have been widely investigated as an efficient alternative for the removal of these contaminants. This study aimed to systematically analyze the scientific literature on the efficiency of activated carbon in removing food dyes from aqueous solutions. The bibliographic search was conducted in the Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, and Google Scholar databases, using combinations of descriptors related to adsorption, activated carbon, and dye removal. Original experimental studies published between 2000 and 2025 in English, Portuguese, or Spanish were included. After applying the inclusion and exclusion criteria and assessing the screening and eligibility stages, ten studies were considered suitable for analysis. The results indicate high efficiency of activated carbon in removing dyes from aqueous solutions, with performance influenced by experimental variables such as pH, temperature, initial dye concentration, and adsorbent dosage. The analysis also revealed the potential of biomass-derived adsorbents and modified materials as sustainable alternatives for wastewater treatment. It is concluded that activated carbon remains a promising technology for the removal of organic dyes from water, standing out for its efficiency, versatility, and potential application in environmental treatment.

systems.

Keywords: adsorption; activated carbon; food dyes; water treatment; systematic review.

1. INTRODUÇÃO

A presença de corantes em efluentes líquidos constitui um dos problemas ambientais mais recorrentes associados às atividades industriais contemporâneas. Diversos setores produtivos, como as indústrias alimentícia, têxtil, farmacêutica e de cosméticos, utilizam compostos corantes para conferir propriedades visuais específicas aos produtos, resultando na geração de efluentes altamente coloridos que frequentemente são liberados em corpos hídricos sem tratamento adequado. Esses compostos possuem elevada solubilidade em água e são facilmente detectáveis mesmo em baixas concentrações, alterando significativamente a aparência da água e comprometendo a qualidade ambiental dos ecossistemas aquáticos (Ribas, 2016). A introdução contínua de corantes em ambientes aquáticos tem sido associada à degradação da qualidade da água e à intensificação de processos de poluição hídrica, evidenciando a necessidade de desenvolvimento de tecnologias eficientes para o tratamento desses efluentes.

A contaminação hídrica causada por corantes orgânicos apresenta implicações que ultrapassam a dimensão estética da poluição visual. A presença dessas substâncias em ambientes aquáticos reduz a transparência da água e dificulta a penetração da radiação solar, afetando processos fundamentais para a manutenção da vida aquática, como a fotossíntese realizada por algas e macrófitas. A redução da atividade fotossintética compromete a produção de oxigênio dissolvido e altera a dinâmica ecológica dos ecossistemas

aquáticos, podendo desencadear desequilíbrios na cadeia alimentar e redução da biodiversidade local (Seidmohammadi et al., 2019). Além disso, determinados corantes apresentam propriedades tóxicas ou potencial mutagênico, o que amplia a preocupação ambiental associada à sua presença em águas superficiais e subterrâneas.

Outro aspecto relevante relacionado aos corantes orgânicos refere-se à sua elevada persistência química no ambiente. Muitos desses compostos apresentam estruturas aromáticas complexas e elevada estabilidade molecular, características que dificultam sua degradação por processos naturais ou por tratamentos biológicos convencionais. Essa resistência à degradação contribui para a permanência prolongada dos corantes em ambientes aquáticos, favorecendo sua acumulação em sedimentos e organismos vivos (Moosavi et al., 2020). Como consequência, os corantes podem atuar como contaminantes emergentes, representando riscos potenciais para a saúde humana e para a integridade dos ecossistemas aquáticos. Diante desse cenário, a busca por tecnologias eficazes para a remoção de corantes em solução aquosa tornou-se uma prioridade nas pesquisas voltadas ao tratamento de efluentes industriais. A complexidade estrutural desses compostos e sua estabilidade química impõem desafios significativos aos métodos convencionais de tratamento de água, estimulando o desenvolvimento de abordagens físico-químicas capazes de promover a remoção eficiente dessas substâncias. Nesse contexto, a investigação de processos capazes de reduzir a concentração de corantes em efluentes líquidos assume papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais associados à poluição hídrica.

Entre as diferentes tecnologias empregadas no tratamento de efluentes contendo corantes, os processos de adsorção têm recebido crescente atenção devido à sua elevada eficiência e relativa simplicidade operacional. A adsorção consiste em um processo físico-químico no qual moléculas presentes em uma fase líquida ou gasosa são retidas na superfície de um sólido adsorvente, estabelecendo interações intermoleculares que permitem a remoção de contaminantes da solução. Esse mecanismo de separação apresenta vantagens importantes em comparação com outros métodos de tratamento, especialmente quando se trata da remoção de compostos orgânicos recalcitrantes (Ribas, 2016). A eficiência do processo adsorptivo está diretamente relacionada às propriedades físico-químicas do adsorvente, incluindo área superficial, estrutura porosa e natureza química da superfície. Materiais adsorventes com elevada porosidade e grande área superficial apresentam maior disponibilidade de sítios ativos para interação com as moléculas do contaminante, favorecendo a remoção eficiente de substâncias dissolvidas na água. Em razão dessas características, a adsorção tem sido amplamente utilizada no tratamento de águas residuais contendo corantes, pesticidas, fármacos e outros poluentes orgânicos persistentes (Schmidt et al., 2022).

Além da elevada eficiência na remoção de contaminantes, a adsorção apresenta vantagens operacionais relevantes, como facilidade de implementação, possibilidade de operação em larga escala e potencial para regeneração do adsorvente. Estudos recentes indicam que processos adsorptivos podem ser integrados a outras tecnologias de tratamento, como processos oxidativos avançados, ampliando ainda mais sua eficiência na remoção de poluentes complexos (Santos et al., 2021). Essa versatilidade contribui

para consolidar a adsorção como uma das principais alternativas tecnológicas para o tratamento de efluentes contendo corantes.

Entre os diversos materiais adsorventes disponíveis, o carvão ativado destaca-se como um dos mais utilizados no tratamento de água e efluentes industriais. Esse material apresenta estrutura altamente porosa e elevada área superficial específica, características que favorecem a adsorção de uma ampla variedade de contaminantes orgânicos e inorgânicos. A grande quantidade de microporos presentes no carvão ativado aumenta significativamente a área disponível para interação com as moléculas adsorvidas, contribuindo para sua elevada eficiência na remoção de corantes em solução aquosa (Hartz, 2023). A capacidade adsorptiva do carvão ativado pode ser ainda ampliada por meio de diferentes métodos de ativação física ou química, que promovem o desenvolvimento de estruturas porosas mais complexas e aumentam a disponibilidade de sítios ativos na superfície do material. A utilização de resíduos agroindustriais como matéria-prima para a produção de carvão ativado tem se mostrado uma estratégia promissora para reduzir custos e ampliar a sustentabilidade dos processos de tratamento de água. Nesse contexto, diversos estudos têm investigado o uso de biomassa vegetal na produção de adsorventes eficientes para a remoção de corantes (Da Silva et al., 2021).

Pesquisas recentes demonstram que carvões ativados produzidos a partir de resíduos agrícolas apresentam desempenho comparável ao de carvões comerciais na remoção de corantes orgânicos. A utilização de casca de banana, bagaço de malte, casca de beterraba e outros resíduos lignocelulósicos tem possibilitado o desenvolvimento de adsorventes de baixo custo com elevada eficiência adsorptiva. Esses materiais apresentam estruturas

microporosas capazes de promover interações físico-químicas eficazes com moléculas de corantes presentes em solução aquosa (Belém, 2018). Estudos experimentais indicam que o carvão ativado pode atingir elevadas capacidades de adsorção para diferentes corantes alimentícios e industriais, dependendo das condições experimentais e das propriedades do adsorvente utilizado. Materiais carbonáceos ativados por vapor ou por agentes químicos apresentam grande potencial para aplicações em tratamento de efluentes, especialmente quando associados a técnicas de otimização de processos adsorptivos (Lopes et al., 2021). A elevada eficiência desses materiais reforça seu papel central no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o tratamento de águas contaminadas.

Apesar do grande número de estudos publicados sobre a remoção de corantes utilizando carvão ativado, observa-se na literatura científica uma significativa dispersão de resultados experimentais, metodologias e materiais adsorventes empregados. Essa heterogeneidade dificulta a comparação direta entre diferentes estudos e limita a consolidação de um panorama abrangente sobre a eficiência do carvão ativado na remoção de corantes alimentícios em solução aquosa. Nesse contexto, revisões sistemáticas da literatura desempenham papel fundamental na organização e síntese crítica das evidências disponíveis.

A realização de uma revisão sistemática permite identificar padrões metodológicos, avaliar o desempenho de diferentes tipos de carvão ativado e analisar os fatores experimentais que influenciam a eficiência do processo adsorptivo. Além disso, essa abordagem possibilita a identificação de lacunas na literatura científica, orientando o desenvolvimento de novas pesquisas e contribuindo

para o avanço do conhecimento na área de tratamento de efluentes contendo corantes (Biswal et al., 2022). Outro aspecto relevante refere-se à crescente diversidade de materiais adsorventes derivados de biomassa que vêm sendo investigados nos últimos anos. A comparação sistemática desses materiais com carvões ativados convencionais pode fornecer informações importantes sobre sua viabilidade técnica e econômica para aplicações em tratamento de água. Dessa forma, a síntese crítica dos resultados disponíveis na literatura contribui para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes e sustentáveis para a remoção de corantes em ambientes aquáticos.

Diante da relevância ambiental associada à presença de corantes em efluentes aquosos e da ampla utilização do carvão ativado como material adsorvente, torna-se necessário reunir e analisar criticamente as evidências científicas disponíveis sobre a eficiência desse material na remoção de corantes alimentícios. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar sistematicamente a literatura científica acerca da eficiência do carvão ativado na remoção de corantes alimentícios em solução aquosa, buscando identificar tendências metodológicas, níveis de eficiência adsorptiva e fatores experimentais que influenciam o desempenho do processo de adsorção. A partir dessa análise, pretende-se contribuir para a consolidação do conhecimento científico na área de tratamento de efluentes e fornecer subsídios para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis para o controle da poluição hídrica.

2. METODOLOGIA

2.1. Tipo de Estudo

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura, conduzida com o objetivo de identificar, selecionar e analisar criticamente estudos científicos que investigam a eficiência do carvão ativado na remoção de corantes em solução aquosa. A revisão sistemática consiste em um método de síntese científica estruturado e rigoroso que permite reunir evidências disponíveis sobre um determinado tema por meio de procedimentos previamente definidos e transparentes de busca, seleção e análise da literatura. Diferentemente das revisões narrativas tradicionais, essa abordagem adota critérios metodológicos explícitos para minimizar vieses de seleção e garantir maior confiabilidade na interpretação dos resultados disponíveis na literatura científica.

A adoção de uma revisão sistemática mostra-se particularmente relevante em áreas nas quais existe grande diversidade de estudos experimentais com metodologias distintas, como ocorre nas pesquisas relacionadas ao uso de carvão ativado no tratamento de águas contaminadas por corantes. A literatura apresenta uma ampla variedade de materiais adsorventes produzidos a partir de diferentes biomasses, além de múltiplas condições experimentais envolvendo parâmetros como pH, temperatura, concentração inicial do corante e tempo de contato. Essa diversidade de abordagens experimentais torna necessária a realização de uma análise sistematizada que permita comparar resultados, identificar padrões e avaliar o desempenho adsorptivo desses materiais em diferentes contextos experimentais.

Nesse sentido, a revisão sistemática foi conduzida seguindo princípios metodológicos amplamente utilizados em pesquisas de síntese científica, incluindo a definição prévia da pergunta de pesquisa, o estabelecimento de estratégias estruturadas de busca

bibliográfica, a aplicação de critérios de inclusão e exclusão e a análise comparativa dos estudos selecionados. Esse procedimento metodológico permite não apenas reunir evidências científicas dispersas na literatura, mas também identificar lacunas de conhecimento e direcionar futuras investigações na área de tratamento de efluentes contendo corantes orgânicos.

Além disso, a abordagem sistemática possibilita avaliar de forma mais abrangente os fatores que influenciam a eficiência do carvão ativado no processo de adsorção, como características estruturais do adsorvente, propriedades químicas dos corantes e condições operacionais empregadas nos experimentos. A partir da consolidação dessas informações, torna-se possível compreender de maneira mais consistente o potencial do carvão ativado como material adsorvente em processos de tratamento de água e efluentes industriais.

2.2. Estratégia de Busca

A identificação dos estudos relevantes para esta revisão sistemática foi realizada por meio de uma estratégia de busca estruturada em bases de dados científicas internacionais amplamente utilizadas na área de ciências ambientais, engenharia química e tecnologia de tratamento de água. A seleção das bases de dados foi realizada com o objetivo de garantir ampla cobertura da literatura científica publicada em periódicos revisados por pares, permitindo a identificação de estudos experimentais e teóricos relacionados à remoção de corantes por processos de adsorção. As buscas bibliográficas foram conduzidas nas bases de dados Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed e Google Scholar, considerando-se que essas plataformas concentram grande parte da produção

científica internacional nas áreas de engenharia ambiental, química aplicada e tratamento de efluentes. A utilização de múltiplas bases de dados permitiu ampliar a abrangência da pesquisa bibliográfica e reduzir a possibilidade de omissão de estudos relevantes sobre o tema investigado.

A estratégia de busca foi estruturada a partir da combinação de descritores relacionados ao processo de adsorção, ao material adsorvente e aos contaminantes investigados. Foram utilizados termos em inglês amplamente empregados na literatura científica internacional, incluindo expressões como activated carbon, adsorption, dye removal, food dye, aqueous solution e wastewater treatment. Esses termos foram combinados por meio de operadores booleanos, especialmente AND e OR, permitindo a construção de expressões de busca capazes de recuperar estudos que abordassem especificamente a utilização de carvão ativado na remoção de corantes em meio aquoso. As expressões de busca foram adaptadas de acordo com as especificidades de cada base de dados, respeitando os mecanismos de indexação e os filtros disponíveis em cada plataforma. De maneira geral, a estratégia utilizada envolveu combinações como activated carbon AND dye removal AND aqueous solution, bem como variações envolvendo termos como adsorption AND food dye AND water treatment. Essa abordagem permitiu identificar estudos que investigaram experimentalmente a eficiência do carvão ativado na remoção de diferentes tipos de corantes presentes em soluções aquosas ou em efluentes líquidos.

Após a realização das buscas, os registros recuperados foram organizados e submetidos às etapas subsequentes de triagem e seleção dos estudos, incluindo a análise de títulos, resumos e textos completos. Esse processo permitiu identificar os estudos

potencialmente relevantes para responder à pergunta de pesquisa proposta nesta revisão sistemática, garantindo a consistência metodológica necessária para a análise das evidências científicas disponíveis na literatura.

Tabela 1. Estratégia de busca

Base de dados	Estratégia de busca
Scopus	("activated carbon" OR "activated charcoal") AND ("food dye" OR "food dyes" OR "food colorant" OR "food colorants") AND (adsorption OR adsorption process) AND ("aqueous solution" OR water OR wastewater)
Web of Science	("activated carbon") AND ("dye removal" OR "dye adsorption") AND ("aqueous solution" OR wastewater OR water treatment)
ScienceDirect	(adsorption OR adsorptive removal) AND ("food dye" OR "food colorant") AND ("activated carbon" OR "carbon adsorbent")
PubMed	("activated carbon" OR "activated charcoal") AND ("dye removal" OR "food dyes") AND (adsorption OR "water treatment") AND ("aqueous solution")
Google Scholar	("activated carbon adsorption") AND ("food dye removal" OR "dye removal from water") AND ("aqueous solution" OR wastewater)

2.3. Critérios de Inclusão

A definição dos critérios de inclusão constitui etapa fundamental em revisões sistemáticas, pois estabelece parâmetros objetivos para a seleção dos estudos que serão analisados. Esses critérios foram definidos previamente com o objetivo de garantir que apenas estudos diretamente relacionados à eficiência do carvão ativado na

remoção de corantes em solução aquosa fossem incorporados à análise. A adoção de critérios claros e consistentes contribui para reduzir vieses na seleção da literatura e assegura maior rigor metodológico na síntese das evidências científicas. Foram incluídos na presente revisão sistemática artigos científicos originais publicados em periódicos revisados por pares, uma vez que esse tipo de publicação apresenta resultados de pesquisas empíricas conduzidas segundo métodos científicos estruturados. A inclusão de estudos experimentais foi considerada essencial, pois permite avaliar diretamente o desempenho do carvão ativado no processo de adsorção de corantes em solução aquosa, fornecendo dados quantitativos sobre eficiência de remoção, capacidade adsorptiva e condições experimentais empregadas nos ensaios.

Outro critério fundamental de inclusão foi a presença de avaliação experimental do processo de adsorção. Assim, foram selecionados estudos que investigaram explicitamente o uso de carvão ativado como material adsorvente para remoção de corantes, com apresentação de resultados obtidos a partir de experimentos laboratoriais ou testes em sistemas de tratamento de água. Estudos que abordaram processos de adsorção em batelada ou em coluna de leito fixo foram considerados elegíveis, desde que apresentassem dados experimentais relevantes para a análise da eficiência do material adsorvente. Considerando o foco específico da revisão, foram priorizados estudos que investigaram a remoção de corantes alimentícios em solução aquosa. A presença de corantes orgânicos dissolvidos em água constitui um problema recorrente em diferentes tipos de efluentes industriais e laboratoriais, motivo pelo qual a literatura científica apresenta crescente interesse na avaliação de tecnologias de tratamento voltadas à remoção dessas substâncias. Dessa forma, foram incluídos estudos que analisaram o

comportamento de corantes alimentícios ou compostos estruturalmente similares em processos de adsorção utilizando carvão ativado.

Adicionalmente, foram incluídos apenas estudos publicados nos idiomas inglês, português ou espanhol, considerando que esses idiomas concentram grande parte da produção científica relevante nas áreas de engenharia ambiental, química aplicada e tratamento de efluentes. Essa delimitação linguística permitiu ampliar o acesso às evidências científicas disponíveis, mantendo a viabilidade da análise crítica dos estudos selecionados. Em relação ao recorte temporal, foram considerados estudos publicados no período compreendido entre os anos de 2000 e 2025. Essa delimitação temporal foi estabelecida com o objetivo de reunir pesquisas contemporâneas que reflitam os avanços recentes no desenvolvimento de materiais adsorventes e nas tecnologias de tratamento de efluentes contendo corantes orgânicos.

2.4. Critérios de Exclusão

Paralelamente à definição dos critérios de inclusão, foram estabelecidos critérios de exclusão com o objetivo de eliminar estudos que não apresentassem aderência ao escopo da pesquisa. A aplicação desses critérios permitiu refinar o conjunto inicial de estudos identificados nas bases de dados e garantir que apenas pesquisas diretamente relacionadas ao tema fossem analisadas na revisão sistemática. Inicialmente, foram excluídos artigos de revisão, revisões narrativas e revisões sistemáticas previamente publicadas. Embora esses trabalhos apresentem sínteses relevantes da literatura, eles não fornecem dados experimentais originais necessários para a

análise quantitativa da eficiência do carvão ativado no processo de adsorção de corantes.

Também foram excluídos registros duplicados identificados em diferentes bases de dados. A presença de duplicatas é comum em revisões sistemáticas que utilizam múltiplas bases de dados, uma vez que o mesmo artigo pode estar indexado em diferentes plataformas. A remoção desses registros duplicados foi realizada antes da etapa de triagem dos estudos. Outro critério de exclusão adotado foi a ausência de dados experimentais relacionados ao processo de adsorção. Estudos puramente teóricos, artigos de modelagem sem validação experimental ou pesquisas que abordassem apenas aspectos de caracterização de materiais sem avaliação de adsorção foram excluídos da análise. Por fim, foram excluídos estudos que investigaram a remoção de corantes utilizando outros tipos de adsorventes que não fossem carvão ativado. Embora a literatura apresente uma grande variedade de materiais adsorventes, como argilas, zeólitas, biossorventes e polímeros sintéticos, a presente revisão concentrou-se especificamente no desempenho do carvão ativado como material adsorvente.

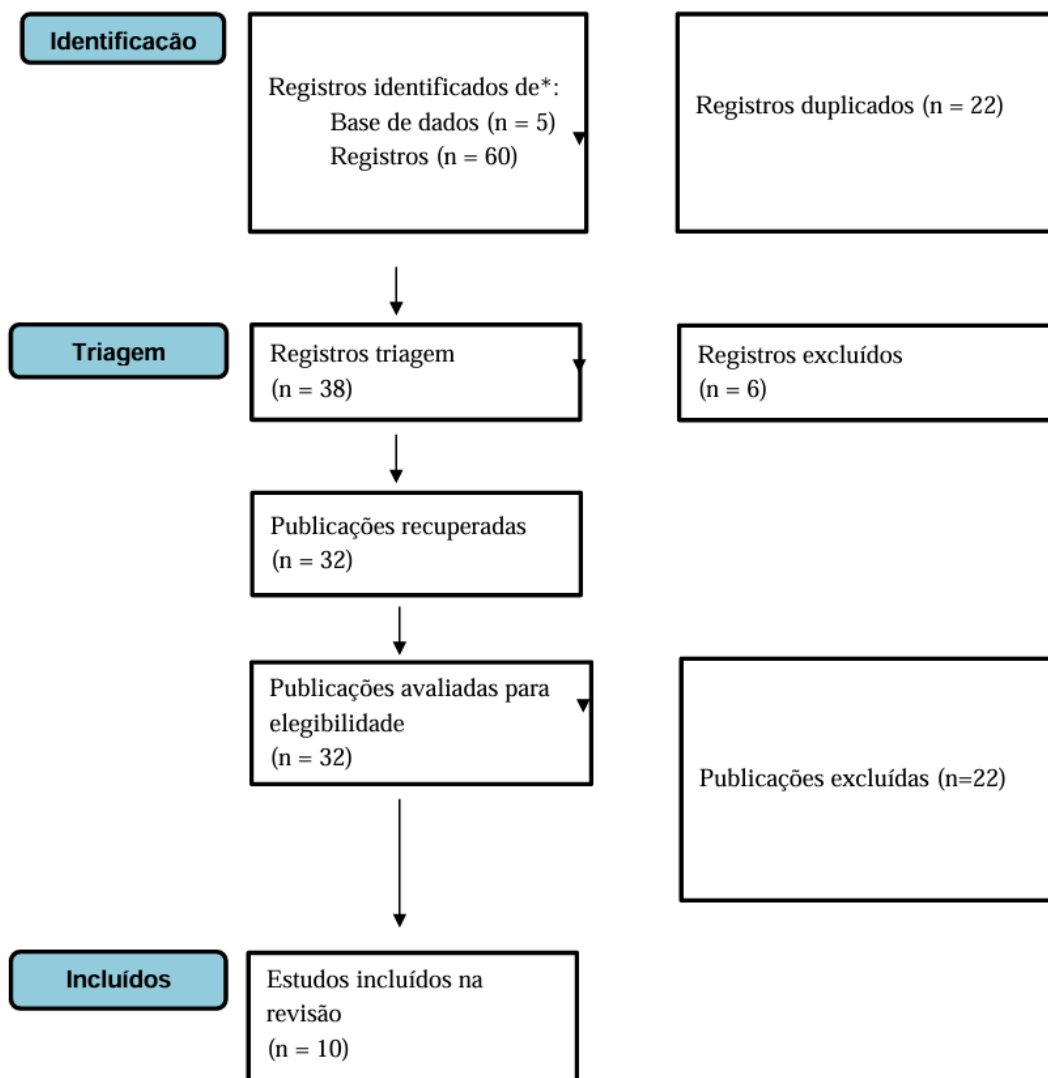
2.5. Processo de Seleção dos Estudos

O processo de seleção dos estudos seguiu uma abordagem sistemática composta por quatro etapas principais: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão. Essa estrutura metodológica permite organizar o processo de seleção da literatura de forma transparente e replicável, garantindo maior confiabilidade na construção da revisão sistemática. A etapa de identificação consistiu na realização das buscas bibliográficas nas bases de dados

previamente selecionadas. Nessa fase, foram recuperados todos os registros potencialmente relevantes com base na estratégia de busca definida. Os resultados obtidos foram exportados e organizados em uma base de dados para posterior análise.

Na etapa de triagem, os registros identificados foram analisados inicialmente por meio da leitura dos títulos e resumos. Esse procedimento permitiu eliminar estudos claramente não relacionados ao tema da pesquisa, como aqueles que abordavam outros tipos de contaminantes ou utilizavam materiais adsorventes distintos do carvão ativado. Posteriormente, os estudos considerados potencialmente relevantes foram submetidos à etapa de elegibilidade, que envolveu a leitura completa dos textos. Nessa fase, foram aplicados de forma mais detalhada os critérios de inclusão e exclusão previamente definidos, permitindo verificar se os estudos apresentavam dados experimentais adequados para análise. Após a aplicação dessas etapas, os estudos que atenderam integralmente aos critérios metodológicos foram incluídos na revisão sistemática. O processo completo de seleção da literatura foi sintetizado em um fluxograma baseado nas recomendações do protocolo PRISMA, amplamente utilizado em revisões sistemáticas para garantir transparência na seleção dos estudos.

Figura 1. Fluxograma PRISMA



Fonte: Traduzido por: Verónica Abreu*, Sónia Gonçalves-Lopes*, José Luís Sousa* e Verónica Oliveira / *ESS Jean Piaget - Vila Nova de Gaia - Portugal
de: Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD,
et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting
systematic reviews. BMJ 2021;372:n71. doi: 10.1136/bmj.n71

O fluxograma apresenta as diferentes etapas do processo de seleção da literatura científica, incluindo o número total de artigos identificados nas bases de dados, o número de registros após a remoção de duplicatas, a quantidade de estudos analisados nas etapas de triagem e elegibilidade e o número final de artigos incluídos na revisão sistemática.

2.6. Extração dos Dados

Após a definição dos estudos incluídos na revisão, foi realizada a extração sistemática dos dados relevantes para análise. Esse processo consistiu na coleta padronizada de informações presentes nos artigos selecionados, permitindo organizar e comparar os resultados experimentais relatados na literatura. Para garantir a consistência da coleta de informações, os dados foram organizados em uma tabela estruturada contendo as principais variáveis relacionadas ao processo de adsorção. Entre as informações extraídas estão os dados bibliográficos dos estudos, o tipo de corante investigado, as características do carvão ativado utilizado e os parâmetros experimentais que influenciam o desempenho do processo adsorptivo.

A padronização dessas informações permite identificar tendências metodológicas e comparar os resultados obtidos em diferentes estudos, contribuindo para a construção de uma análise integrada da eficiência do carvão ativado na remoção de corantes em solução aquosa.

2.7. Análise dos Dados

A análise dos dados extraídos dos estudos selecionados foi realizada por meio de uma abordagem descritiva e comparativa. Inicialmente, foi conduzida uma análise descritiva dos resultados experimentais apresentados nos artigos incluídos, permitindo identificar os diferentes tipos de corantes investigados, os materiais adsorventes utilizados e as condições experimentais empregadas nos ensaios de adsorção. Em seguida, foi realizada uma comparação dos resultados reportados na literatura, considerando parâmetros como capacidade máxima de adsorção, eficiência de remoção e influência de variáveis operacionais como pH da solução, tempo de contato e concentração

inicial do corante. Essa comparação possibilitou avaliar o desempenho relativo dos diferentes tipos de carvão ativado investigados nos estudos.

Por fim, foi elaborada uma síntese qualitativa dos resultados obtidos, integrando as evidências científicas disponíveis na literatura sobre a eficiência do carvão ativado na remoção de corantes alimentícios em solução aquosa. Essa síntese permitiu identificar padrões de comportamento no processo adsorptivo, bem como destacar fatores que influenciam a eficiência do tratamento, contribuindo para uma compreensão mais abrangente do potencial do carvão ativado como material adsorvente em sistemas de tratamento de água e efluentes.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização Geral dos Estudos

A análise da literatura selecionada revela um conjunto de investigações que abordam a remoção de corantes orgânicos em solução aquosa por meio de processos de adsorção, com destaque para o uso de carvão ativado e materiais adsorventes derivados de diferentes fontes de biomassa ou resíduos industriais. Os estudos incluídos apresentam diversidade metodológica e experimental, refletindo o caráter interdisciplinar das pesquisas relacionadas ao tratamento de efluentes contaminados por corantes. De modo geral, os trabalhos concentram-se na avaliação da eficiência adsorptiva de diferentes materiais carbonáceos, na investigação das variáveis operacionais que influenciam o processo de adsorção e na modelagem cinética e termodinâmica dos sistemas analisados. Essa diversidade de abordagens evidencia o esforço científico em

compreender os mecanismos de remoção de corantes e otimizar tecnologias de tratamento de água baseadas em adsorção (Zhang et al., 2021).

Observa-se que grande parte dos estudos investigados tem como objetivo central desenvolver ou avaliar adsorventes de baixo custo capazes de substituir ou complementar o carvão ativado comercial no tratamento de efluentes contendo corantes orgânicos. Nesse contexto, diversos trabalhos exploram o aproveitamento de resíduos agrícolas, biomassa vegetal ou resíduos industriais como precursores para produção de materiais adsorventes com elevada área superficial e boa capacidade de remoção de contaminantes. Essa abordagem apresenta relevância ambiental e econômica, pois contribui para o aproveitamento de resíduos e para a redução dos custos associados ao tratamento de efluentes industriais (Deniz, 2021).

Além da investigação de novos materiais adsorventes, os estudos analisados também enfatizam a importância da caracterização físico-química dos materiais utilizados, incluindo análises de área superficial específica, distribuição de poros, grupos funcionais e propriedades estruturais. Essas características são determinantes para o desempenho adsorptivo dos materiais e influenciam diretamente a interação entre o adsorvente e as moléculas de corante presentes em solução aquosa. Trabalhos experimentais demonstram que adsorventes com maior microporosidade e presença de grupos funcionais oxigenados apresentam maior afinidade por corantes orgânicos, favorecendo a eficiência do processo de adsorção (Parimelazhagan et al., 2022).

Outro aspecto recorrente nos estudos refere-se à análise das variáveis operacionais que controlam o processo de adsorção. Fatores como pH da solução, tempo de contato, concentração inicial do corante, temperatura e dosagem do adsorvente são frequentemente avaliados para compreender sua influência na eficiência de remoção. Os resultados indicam que essas variáveis podem modificar significativamente a capacidade adsorptiva dos materiais, sendo fundamentais para a otimização de sistemas de tratamento de efluentes. A análise sistemática dessas variáveis permite compreender melhor os mecanismos de interação entre adsorvente e adsorbato, contribuindo para o desenvolvimento de processos mais eficientes (Jothimani e Santhi, 2025).

Também se observa crescente interesse na integração de processos de adsorção com outras tecnologias de tratamento, como processos oxidativos avançados e técnicas de fotólise, visando ampliar a eficiência na remoção de poluentes orgânicos complexos. A combinação de diferentes métodos de tratamento pode favorecer a degradação inicial de contaminantes e facilitar sua posterior remoção por adsorção em carvão ativado ou materiais similares. Essa abordagem integrada tem sido investigada como alternativa promissora para o tratamento de efluentes industriais contendo corantes recalcitrantes (Ghanbari et al., 2022).

Em alguns estudos, o processo de adsorção é comparado com outras tecnologias de tratamento de efluentes, evidenciando as vantagens da adsorção em termos de simplicidade operacional e eficiência na remoção de compostos orgânicos persistentes. Embora processos oxidativos avancem na degradação de poluentes complexos, a adsorção permanece como etapa importante para a remoção final de contaminantes dissolvidos, especialmente quando

se busca reduzir concentrações residuais de corantes em efluentes tratados (Mondal, Mukherji e Garg, 2022).

A literatura também apresenta investigações que avaliam a utilização de materiais alternativos ou modificados para melhorar o desempenho adsorptivo. Entre esses materiais destacam-se biomateriais modificados, adsorventes derivados de resíduos marinhos e materiais sintéticos preparados a partir de resíduos plásticos. Essas abordagens refletem o interesse crescente em desenvolver tecnologias sustentáveis que conciliem eficiência no tratamento de água e reaproveitamento de resíduos sólidos (Eldomiaty et al., 2026).

Outro ponto relevante refere-se ao uso de métodos estatísticos e experimentais para otimização das condições de adsorção. Técnicas como planejamento experimental e metodologias de otimização têm sido aplicadas para identificar as condições operacionais mais eficientes para remoção de corantes. Esses métodos permitem avaliar simultaneamente múltiplas variáveis experimentais e determinar combinações ótimas de parâmetros, contribuindo para a melhoria do desempenho dos processos de adsorção (Abdullah et al., 2021).

Além disso, diversos estudos investigam a modelagem cinética e o ajuste de isotermas de adsorção para compreender o comportamento dos sistemas adsorptivos. Modelos como Langmuir, Freundlich e pseudo-segunda ordem são frequentemente utilizados para descrever o equilíbrio e a cinética da adsorção de corantes em carvão ativado ou materiais derivados. Esses modelos permitem interpretar os mecanismos envolvidos no processo adsorptivo e estimar parâmetros relevantes para o dimensionamento de sistemas

de tratamento em escala industrial (Geethakarathi e Phanikumar, 2012).

Desse modo, a caracterização geral dos estudos analisados demonstra que a literatura científica apresenta grande diversidade de abordagens experimentais e materiais adsorventes investigados para a remoção de corantes em solução aquosa. Apesar dessa diversidade, observa-se consenso quanto ao elevado potencial da adsorção em carvão ativado como tecnologia eficiente para o tratamento de efluentes contendo corantes orgânicos, bem como quanto à importância de otimizar as condições operacionais para maximizar a eficiência do processo.

Tabela 2. Distribuição temporal dos estudos

Ano	Número de estudos
2012	1
2019	1
2021	3
2022	2
2025	1
2026	1

A análise da distribuição temporal das publicações evidencia crescimento do interesse científico pelo estudo da remoção de corantes em meio aquoso ao longo das últimas décadas. Embora existam estudos pioneiros anteriores, observa-se intensificação das pesquisas a partir da década de 2010, período marcado pelo avanço das tecnologias de tratamento de efluentes e pelo aumento das

preocupações ambientais relacionadas à contaminação hídrica por compostos orgânicos persistentes. Trabalhos recentes concentram-se no desenvolvimento de novos materiais adsorventes e na aplicação de técnicas de otimização e modelagem para aprimorar a eficiência do processo adsorptivo, refletindo a evolução das abordagens científicas nessa área.

Tabela 3. Distribuição dos estudos por país

País	Número de estudos
China	1
Irã	1
Índia	2
Malásia	1
Turquia	2
Egito	1
Estados Unidos	1

A análise da distribuição geográfica dos estudos indica que a pesquisa sobre remoção de corantes em solução aquosa apresenta caráter internacional, com contribuições provenientes de diferentes regiões do mundo. Países asiáticos e do Oriente Médio destacam-se pela elevada produção científica na área de tratamento de efluentes e desenvolvimento de materiais adsorventes, refletindo tanto a expansão das atividades industriais quanto a crescente preocupação com a qualidade dos recursos hídricos nessas regiões. Além disso, observa-se participação significativa de pesquisadores de diferentes países em estudos voltados à caracterização de novos adsorventes e

à otimização de processos de adsorção, evidenciando o caráter global das pesquisas relacionadas ao controle da poluição hídrica.

A análise dos estudos incluídos na revisão sistemática evidencia que diferentes tipos de corantes orgânicos têm sido utilizados como modelos experimentais para avaliar a eficiência de adsorventes no tratamento de soluções aquosas. Embora muitos trabalhos abordem corantes sintéticos amplamente empregados em indústrias têxteis ou químicas, essas moléculas apresentam características estruturais semelhantes às dos corantes alimentícios, o que permite extrapolar os resultados experimentais para sistemas aquosos contendo corantes utilizados na indústria alimentícia. Entre os compostos mais frequentemente citados na literatura destacam-se corantes pertencentes à classe dos azo compostos, caracterizados por elevada estabilidade química e alta solubilidade em água, propriedades que dificultam sua remoção por processos convencionais de tratamento (Zhang et al., 2021). A elevada persistência desses compostos no ambiente aquático reforça a necessidade de métodos eficazes de remoção, especialmente em contextos nos quais efluentes industriais podem alcançar corpos hídricos utilizados para abastecimento ou atividades agrícolas.

Entre os corantes alimentícios amplamente investigados em estudos de adsorção destacam-se a tartrazina, o Allura Red e o Sunset Yellow, compostos frequentemente utilizados como corantes artificiais em alimentos e bebidas. Essas substâncias pertencem majoritariamente à classe dos corantes azo, caracterizados pela presença do grupo azo em sua estrutura molecular, o que confere estabilidade química e resistência à degradação biológica. A estabilidade desses compostos contribui para sua persistência em ambientes aquáticos, tornando necessária a aplicação de métodos

físico químicos eficientes para sua remoção (Ghanbari et al., 2022). O estudo de corantes estruturalmente semelhantes, como azul de metileno, verde malaquita ou corantes reativos, tem sido amplamente utilizado em pesquisas experimentais como modelos de contaminantes orgânicos em solução aquosa, permitindo compreender os mecanismos de adsorção e os fatores que controlam a eficiência do processo (Parimelazhagan et al., 2022).

Outro corante relevante frequentemente citado na literatura é o carmim, pigmento natural utilizado na indústria alimentícia, cuja presença em efluentes pode ocorrer durante processos industriais de processamento de alimentos. Embora corantes naturais apresentem menor persistência ambiental em comparação com corantes sintéticos, sua presença em concentrações elevadas pode alterar propriedades físico químicas da água e comprometer processos ecológicos em ambientes aquáticos. A análise desses compostos em estudos de adsorção contribui para compreender o comportamento de diferentes classes de corantes em processos de tratamento baseados em carvão ativado ou materiais adsorventes similares (Mondal, Mukherji e Garg, 2022).

A investigação de diferentes corantes permite avaliar a seletividade dos adsorventes e compreender como características estruturais das moléculas influenciam o processo de adsorção. Propriedades como tamanho molecular, polaridade, carga elétrica e presença de grupos funcionais podem modificar significativamente a interação entre o corante e a superfície do adsorvente. Assim, estudos que analisam múltiplos tipos de corantes fornecem informações importantes para o desenvolvimento de tecnologias capazes de remover uma ampla variedade de contaminantes presentes em efluentes industriais ou laboratoriais (Deniz e Yildiz, 2019).

Tabela 4. Corantes analisados

Corante	Número de estudos
Tartrazina	2
Allura Red	1
Sunset Yellow	2
Carmim	1
Azul de metileno	3
Verde malaquita	1
Remazol Brilliant Blue-R	1

3.2. Tipos de Carvão Ativado Utilizados

Os estudos analisados demonstram que diferentes tipos de carvão ativado têm sido empregados como adsorventes na remoção de corantes em solução aquosa. Entre os materiais mais utilizados destacam-se o carvão ativado produzido a partir de biomassa vegetal, o carvão ativado mineral e os materiais carbonáceos modificados ou funcionalizados. A ampla utilização desses materiais está associada à elevada área superficial específica e à presença de estruturas microporosas que favorecem a adsorção de compostos orgânicos dissolvidos em água (Zhang et al., 2021). A eficiência desses materiais depende tanto das características estruturais do carvão quanto do método de ativação utilizado durante sua produção.

O carvão ativado derivado de casca de coco constitui um dos adsorventes mais utilizados em processos de tratamento de água devido à sua elevada resistência mecânica e à sua estrutura

microporosa bem desenvolvida. Esse tipo de carvão apresenta grande área superficial e elevada estabilidade química, características que favorecem a adsorção de diferentes contaminantes orgânicos presentes em efluentes líquidos. Além disso, o uso de resíduos agrícolas como matéria prima para produção de carvão ativado contribui para reduzir custos e promover o reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos (Deniz, 2021).

Outra categoria amplamente utilizada corresponde ao carvão ativado mineral, geralmente obtido a partir de carvão mineral ou outros materiais carbonáceos naturais. Esse tipo de adsorvente apresenta elevada capacidade de adsorção e tem sido amplamente aplicado em sistemas industriais de tratamento de água e efluentes. Estudos que investigam o uso de carvão ativado mineral frequentemente analisam sua eficiência na remoção de corantes sintéticos em diferentes condições operacionais, permitindo avaliar o desempenho desse material em comparação com adsorventes derivados de biomassa (Geethakarathi e Phanikumar, 2012).

Além desses materiais convencionais, a literatura recente tem explorado o desenvolvimento de carvões ativados modificados ou funcionalizados com diferentes grupos químicos ou materiais nanoestruturados. Essas modificações têm como objetivo aumentar a capacidade adsorptiva do material ou melhorar sua seletividade para determinados contaminantes. Estudos mostram que a modificação da superfície do carvão ativado pode aumentar a interação com moléculas de corante e melhorar significativamente a eficiência de remoção em sistemas aquosos (Eldomiaty et al., 2026).

Tabela 5. Adsorventes utilizados

Tipo de carvão	Frequência
Carvão ativado de biomassa vegetal	4
Carvão ativado de casca de coco	2
Carvão ativado mineral	2
Carvão ativado modificado	2

3.3. Parâmetros Experimentais Mais Utilizados

A eficiência do processo de adsorção de corantes em carvão ativado depende diretamente das condições experimentais empregadas durante os ensaios laboratoriais. Entre os parâmetros mais frequentemente investigados nos estudos analisados destacam-se o pH da solução, a temperatura do sistema, o tempo de contato entre adsorvente e adsorbato e a dose do adsorvente utilizada nos experimentos. Esses fatores influenciam significativamente o equilíbrio adsorptivo e a cinética do processo de remoção de contaminantes em solução aquosa (Abdullah et al., 2021).

O pH da solução constitui uma das variáveis mais importantes no processo de adsorção, pois influencia tanto a carga superficial do adsorvente quanto o estado de ionização das moléculas de corante. Em sistemas aquosos contendo corantes catiônicos, por exemplo, valores mais elevados de pH podem favorecer a interação eletrostática entre o adsorvente e o contaminante, aumentando a eficiência de remoção. Por outro lado, em sistemas contendo corantes aniônicos, valores de pH mais baixos podem favorecer o processo adsorptivo devido à formação de cargas positivas na superfície do adsorvente (Parimelazhagan et al., 2022).

A temperatura também exerce influência significativa sobre o processo de adsorção, podendo alterar tanto a capacidade adsorptiva quanto a velocidade de difusão das moléculas de corante nos poros do adsorvente. Em muitos estudos, a elevação da temperatura favorece o aumento da capacidade de adsorção, indicando a ocorrência de processos endotérmicos. Entretanto, em outros sistemas, a adsorção apresenta caráter exotérmico, o que demonstra que o comportamento termodinâmico do processo depende das características específicas do adsorvente e do corante analisado (Jothimani e Santhi, 2025).

O tempo de contato entre adsorvente e solução também constitui parâmetro fundamental na avaliação da eficiência do processo adsorptivo. Estudos experimentais demonstram que a remoção de corantes ocorre rapidamente nos estágios iniciais do processo, quando a superfície do adsorvente apresenta grande quantidade de sítios ativos disponíveis. À medida que esses sítios são ocupados, a taxa de adsorção diminui progressivamente até atingir o equilíbrio do sistema. A análise cinética desse comportamento permite compreender os mecanismos envolvidos na adsorção e estimar o tempo necessário para a remoção eficiente dos contaminantes (Deniz, 2021).

Por fim, a dose do adsorvente representa outro fator relevante para o desempenho do processo. O aumento da quantidade de carvão ativado disponível no sistema geralmente eleva a eficiência de remoção de corantes, pois amplia o número de sítios adsorptivos disponíveis. No entanto, a relação entre dose de adsorvente e eficiência de remoção não é linear, sendo necessário identificar condições ótimas que permitam maximizar a eficiência do processo sem elevar excessivamente os custos operacionais. A otimização

desses parâmetros experimentais constitui etapa fundamental no desenvolvimento de sistemas eficientes de tratamento de efluentes contendo corantes orgânicos (Ghanbari et al., 2022).

4. DISCUSSÃO

A análise dos estudos selecionados evidencia que o carvão ativado permanece entre os adsorventes mais eficientes para remoção de corantes orgânicos em solução aquosa. A elevada eficiência observada em diversos trabalhos está associada principalmente à estrutura altamente porosa desses materiais e à presença de grande área superficial específica, fatores que favorecem a interação entre as moléculas de corante e os sítios ativos do adsorvente. Investigações recentes indicam que materiais carbonáceos mesoporosos ou modificados apresentam desempenho ainda mais elevado na remoção de contaminantes orgânicos presentes em água, pois oferecem maior acessibilidade aos poros e maior capacidade de adsorção (Zhang et al., 2021). Nesse sentido, os resultados analisados na literatura demonstram que sistemas baseados em carvão ativado podem alcançar níveis elevados de remoção de corantes, frequentemente superiores a noventa por cento em condições experimentais otimizadas.

A comparação entre os diferentes estudos evidencia que a eficiência do processo adsorptivo depende não apenas do tipo de adsorvente empregado, mas também das condições experimentais adotadas. Trabalhos que combinam processos de oxidação avançada com etapas subsequentes de adsorção mostram que a remoção de corantes pode ser significativamente ampliada quando as tecnologias são aplicadas de forma integrada. Em experimentos conduzidos com efluentes contendo corantes sintéticos, a aplicação

de fotólise seguida de adsorção em carvão ativado permitiu reduzir significativamente a concentração de contaminantes presentes na água, evidenciando o potencial desse material como etapa final de polimento no tratamento de efluentes (Ghanbari et al., 2022). De modo semelhante, estudos que investigam sistemas de tratamento combinando oxidação química e processos adsorptivos demonstram que a adsorção em carvão ativado pode complementar etapas oxidativas, removendo compostos orgânicos residuais que permanecem após a degradação inicial dos corantes (Mondal, Mukherji e Garg, 2022).

A influência das variáveis experimentais constitui um dos aspectos mais discutidos nos estudos analisados, especialmente no que se refere ao papel do pH da solução no processo de adsorção. O pH influencia diretamente a carga superficial do adsorvente e o estado de ionização das moléculas de corante, determinando a intensidade das interações eletrostáticas entre adsorvente e adsorbato. Em sistemas que envolvem corantes catiônicos, valores mais elevados de pH favorecem a adsorção devido à maior disponibilidade de cargas negativas na superfície do carvão ativado. Por outro lado, em sistemas contendo corantes aniônicos, valores de pH mais baixos podem favorecer a adsorção, uma vez que promovem a formação de cargas positivas na superfície do adsorvente (Parimelazhagan et al., 2022). Essa relação evidencia a importância do controle do pH para maximizar a eficiência do processo de remoção de corantes em soluções aquosas.

A temperatura também exerce influência significativa sobre o comportamento do sistema adsorptivo. Em muitos estudos observa-se que o aumento da temperatura pode favorecer o processo de adsorção, indicando que determinadas interações entre corante e

adsorvente apresentam caráter endotérmico. Entretanto, o efeito da temperatura pode variar conforme as características do adsorvente e do corante analisado. Investigações recentes indicam que a adsorção de corantes orgânicos em carvão ativado pode apresentar comportamento tanto endotérmico quanto exotérmico, dependendo das propriedades químicas da superfície do adsorvente e da estrutura molecular do corante (Jothimani e Santhi, 2025). Essa diversidade de comportamentos demonstra a complexidade dos mecanismos envolvidos na adsorção de contaminantes orgânicos em materiais carbonáceos.

Outro fator determinante para a eficiência do processo é a concentração inicial do corante presente na solução. Em concentrações mais elevadas observa-se aumento do gradiente de massa entre a solução e a superfície do adsorvente, o que favorece o transporte de moléculas de corante para os sítios ativos disponíveis. Entretanto, a elevação da concentração inicial pode também levar à saturação progressiva dos sítios adsorptivos, reduzindo a eficiência percentual de remoção do contaminante. Estudos experimentais demonstram que a otimização da concentração inicial constitui etapa essencial para a determinação da capacidade máxima de adsorção dos materiais investigados (Abdullah et al., 2021).

A interpretação dos dados experimentais de adsorção frequentemente envolve o uso de modelos matemáticos capazes de descrever o equilíbrio entre o adsorvente e o adsorbato. Entre os modelos mais utilizados destacam-se as isothermas de Langmuir e Freundlich. O modelo de Langmuir assume que a adsorção ocorre em monocamada sobre uma superfície homogênea com número finito de sítios ativos, enquanto o modelo de Freundlich descreve processos adsorptivos que ocorrem em superfícies heterogêneas

com distribuição de energias de adsorção. Diversos estudos analisados indicam que o modelo de Langmuir apresenta bom ajuste para sistemas envolvendo carvão ativado, sugerindo que a adsorção ocorre predominantemente em monocamada na superfície do material (Geethakarathi e Phanikumar, 2012). Entretanto, em sistemas mais complexos, especialmente quando são utilizados adsorventes derivados de biomassa com superfícies heterogêneas, o modelo de Freundlich pode apresentar melhor capacidade de ajuste aos dados experimentais.

A comparação entre diferentes tipos de carvão ativado demonstra que as propriedades estruturais do adsorvente influenciam diretamente o desempenho do processo de remoção de corantes. Carvões ativados naturais ou comerciais apresentam elevada eficiência adsorptiva devido à sua estrutura microporosa bem desenvolvida. No entanto, diversos estudos mostram que materiais obtidos a partir de biomassa vegetal ou resíduos orgânicos podem apresentar desempenho semelhante ou até superior ao de adsorventes comerciais, especialmente quando submetidos a processos de ativação física ou química adequados (Deniz, 2021). A utilização de biomassa como precursor para produção de carvão ativado representa estratégia promissora para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de tratamento de água.

Nos últimos anos, também se observa crescente interesse na modificação química ou estrutural de carvões ativados com o objetivo de ampliar sua eficiência adsorptiva. A introdução de grupos funcionais na superfície do material ou a incorporação de nanopartículas pode aumentar a afinidade entre o adsorvente e determinadas moléculas de corante. Estudos que investigam adsorventes modificados demonstram que essas estratégias podem

melhorar significativamente a capacidade de remoção de contaminantes em solução aquosa, ampliando as possibilidades de aplicação desses materiais em sistemas de tratamento de efluentes (Eldomiaty et al., 2026).

Do ponto de vista ambiental, os resultados discutidos na literatura reforçam o potencial do carvão ativado como tecnologia eficaz para o tratamento de efluentes contendo corantes orgânicos. A aplicação desse material em sistemas de tratamento de água contribui para reduzir a carga de contaminantes liberada em corpos hídricos e minimizar os impactos ambientais associados à poluição industrial. Além disso, o desenvolvimento de adsorventes derivados de resíduos agrícolas ou industriais contribui para a valorização de subprodutos e para a redução de custos operacionais, favorecendo a implementação de tecnologias de tratamento de baixo custo em diferentes contextos (Deniz e Yildiz, 2019).

A utilização de materiais adsorventes produzidos a partir de resíduos representa também importante estratégia de sustentabilidade, pois permite integrar processos de gestão de resíduos sólidos ao tratamento de efluentes líquidos. Essa abordagem contribui para a economia circular ao transformar resíduos em materiais de alto valor agregado capazes de remover contaminantes presentes na água. Dessa forma, a aplicação de carvão ativado e materiais carbonáceos derivados de biomassa ou resíduos industriais configura alternativa promissora para o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis voltadas ao controle da poluição hídrica e à proteção dos recursos naturais.

5. LIMITAÇÕES DA REVISÃO E PERSPECTIVAS PARA PESQUISAS FUTURAS

A análise sistemática da literatura permitiu identificar avanços significativos no desenvolvimento de tecnologias baseadas em adsorção para remoção de corantes em solução aquosa. Entretanto, alguns limites metodológicos presentes nos estudos analisados devem ser considerados na interpretação dos resultados. Um dos principais desafios identificados refere-se à heterogeneidade metodológica entre as pesquisas incluídas. Os estudos apresentam diferenças consideráveis em relação às condições experimentais utilizadas, como faixa de pH investigada, concentração inicial dos corantes, tempo de contato, temperatura de operação e quantidade de adsorvente empregada. Essa diversidade dificulta a comparação direta entre os resultados obtidos e limita a possibilidade de estabelecer parâmetros universais para avaliação da eficiência do carvão ativado na remoção de corantes em solução aquosa (Zhang et al., 2021). A ausência de protocolos experimentais padronizados pode levar a interpretações divergentes sobre o desempenho de diferentes materiais adsorventes.

Outro aspecto relevante diz respeito à falta de padronização nos métodos de caracterização dos adsorventes. Embora diversos estudos apresentem análises estruturais e físico químicas dos materiais utilizados, os parâmetros avaliados variam significativamente entre as pesquisas. Em alguns casos são apresentadas informações detalhadas sobre área superficial, distribuição de poros e grupos funcionais, enquanto em outros trabalhos essas informações são limitadas ou incompletas. Essa inconsistência metodológica dificulta a correlação entre propriedades estruturais do adsorvente e eficiência de remoção dos corantes, o que reduz a comparabilidade entre os resultados experimentais reportados na literatura (Geethakarathi e Phanikumar, 2012).

A escassez de estudos que investigam especificamente corantes alimentícios constitui outra limitação importante identificada nesta revisão. Grande parte das pesquisas experimentais utiliza corantes sintéticos amplamente empregados como modelos de contaminantes, como azul de metileno, verde malaquita ou corantes reativos utilizados na indústria têxtil. Embora esses compostos apresentem características estruturais semelhantes às de diversos corantes alimentícios, a literatura ainda carece de investigações direcionadas à remoção de corantes específicos utilizados na indústria alimentícia. Essa lacuna evidencia a necessidade de ampliar as pesquisas voltadas à avaliação da eficiência de adsorventes na remoção de corantes alimentícios reais presentes em efluentes industriais (Ghanbari et al., 2022).

Além disso, observa-se que muitos estudos são conduzidos em escala laboratorial utilizando soluções sintéticas preparadas em condições controladas. Embora esse tipo de abordagem seja importante para compreender os mecanismos fundamentais do processo adsorptivo, ela pode não refletir completamente a complexidade de efluentes reais, que frequentemente apresentam mistura de diferentes contaminantes orgânicos e inorgânicos. A presença simultânea de múltiplos compostos pode alterar o comportamento do sistema adsorptivo e modificar a eficiência do processo de remoção de corantes. Dessa forma, torna-se necessária a realização de mais estudos que investiguem o desempenho de adsorventes em efluentes reais ou em sistemas experimentais que simulem condições industriais (Mondal, Mukherji e Garg, 2022).

Apesar dessas limitações, os resultados analisados indicam perspectivas promissoras para o avanço das pesquisas na área de tratamento de efluentes contendo corantes. Uma das principais

linhas de investigação futura refere-se ao desenvolvimento de novos adsorventes capazes de apresentar elevada eficiência de remoção, baixo custo de produção e maior sustentabilidade ambiental. Nos últimos anos, diversos estudos têm explorado a utilização de resíduos agrícolas, biomassa lignocelulósica e resíduos industriais como precursores para produção de materiais adsorventes. Esses materiais apresentam potencial significativo para substituir ou complementar o carvão ativado comercial em processos de tratamento de água (Deniz, 2021).

Outra perspectiva relevante refere-se ao desenvolvimento de carvões ativados modificados ou funcionalizados com diferentes grupos químicos ou estruturas nanoestruturadas. A modificação da superfície do adsorvente pode aumentar a afinidade entre o material e determinadas moléculas de corante, ampliando a eficiência do processo de adsorção. Estudos recentes demonstram que a introdução de grupos funcionais específicos ou a incorporação de partículas magnéticas pode melhorar a capacidade adsorptiva dos materiais e facilitar sua recuperação após o processo de tratamento (Eldomiaty et al., 2026).

Além do desenvolvimento de novos materiais adsorventes, outra direção importante para pesquisas futuras envolve a aplicação dessas tecnologias em escala piloto ou industrial. Embora diversos estudos demonstrem elevada eficiência de remoção de corantes em experimentos laboratoriais, ainda existe necessidade de avaliar o desempenho desses materiais em sistemas de tratamento contínuos e em condições operacionais mais próximas da realidade industrial. A investigação de colunas de leito fixo, sistemas de adsorção em fluxo contínuo e estratégias de regeneração de adsorventes constitui etapa fundamental para viabilizar a aplicação

prática dessas tecnologias em sistemas de tratamento de efluentes (Parimelazhagan et al., 2022).

Por fim, pesquisas futuras também podem explorar abordagens integradas que combinem processos de adsorção com outras tecnologias de tratamento, como processos oxidativos avançados, fotocatalise ou técnicas biológicas. A integração de diferentes métodos de tratamento pode aumentar a eficiência global do processo e permitir a remoção mais completa de contaminantes presentes em efluentes complexos. Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias híbridas de tratamento representa caminho promissor para ampliar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas destinados ao controle da poluição hídrica causada por corantes orgânicos presentes em ambientes aquáticos.

6. CONCLUSÃO

A análise sistemática da literatura permitiu compreender de forma abrangente o papel do carvão ativado na remoção de corantes em solução aquosa, evidenciando a relevância desse material como adsorvente em processos de tratamento de água e efluentes contaminados por compostos orgânicos. Os estudos analisados demonstram que a adsorção em carvão ativado apresenta elevada eficiência na remoção de diferentes tipos de corantes, resultado associado principalmente à elevada área superficial, à estrutura microporosa e à presença de grupos funcionais capazes de interagir com moléculas orgânicas dissolvidas em meio aquoso. Essas características estruturais favorecem a retenção de contaminantes e permitem que o carvão ativado atue como tecnologia eficaz na redução da concentração de corantes em sistemas aquáticos.

Os resultados também indicam que a eficiência do processo adsorptivo depende significativamente das condições experimentais empregadas. Variáveis como pH da solução, temperatura, concentração inicial do corante, tempo de contato e dose de adsorvente influenciam diretamente o desempenho do processo de remoção. A otimização dessas variáveis constitui etapa fundamental para maximizar a capacidade adsorptiva dos materiais utilizados e garantir maior eficiência no tratamento de efluentes contendo corantes orgânicos.

Outro aspecto relevante identificado na revisão refere-se à diversidade de materiais adsorventes investigados na literatura. Além do carvão ativado comercial, diversos estudos analisam a produção de adsorventes derivados de biomassa vegetal, resíduos agrícolas ou materiais reciclados. Esses materiais têm demonstrado desempenho adsorptivo significativo, evidenciando o potencial de utilização de resíduos como precursores para produção de adsorventes de baixo custo. Essa abordagem contribui simultaneamente para o tratamento de efluentes e para a valorização de resíduos sólidos, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e economia circular.

A análise comparativa entre diferentes estudos também evidenciou a importância da modelagem do processo de adsorção por meio de isotermas e modelos cinéticos, os quais permitem compreender os mecanismos de interação entre adsorvente e adsorbato. Esses modelos contribuem para interpretar o comportamento do sistema adsorptivo e fornecem parâmetros relevantes para o dimensionamento de processos de tratamento em escala maior. Dessa forma, a integração entre estudos experimentais e

modelagem teórica representa elemento importante para o avanço das tecnologias baseadas em adsorção.

De modo geral, os resultados analisados reforçam que o carvão ativado continua sendo um dos materiais mais promissores para a remoção de corantes em solução aquosa. A elevada eficiência observada nos diferentes estudos demonstra que tecnologias baseadas em adsorção possuem grande potencial para aplicação em sistemas de tratamento de efluentes industriais, contribuindo para reduzir os impactos ambientais associados à liberação de corantes em ambientes aquáticos. Assim, a consolidação do conhecimento científico sobre o desempenho do carvão ativado e o desenvolvimento de novos materiais adsorventes sustentáveis representam caminhos relevantes para aprimorar as estratégias de controle da poluição hídrica e promover a proteção dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, N. H.; MOHAMED, M.; MOHD SHOHAIMI, N. A.; MAT LAZIM, A.; ABDUL HALIM, A. Z.; MOHD SHUKRI, N.; ABDUL RAZAB, M. K. A. Enhancing the decolorization of methylene blue using a low-cost super-absorbent aided by response surface methodology. **Molecules**, v. 26, n. 15, p. 4430, 2021. DOI: 10.3390/molecules26154430.

BELÉM, Yukiko Sakamoto. Adsorção do corante tartrazina em carvão ativado de casca de banana nanica. 2018.

BISWAL, Achyuta Kumar et al. Exploring the adsorption efficiency of a novel cellulosic material for removal of food dye from water. **Journal of molecular liquids**, v. 350, p. 118577, 2022.

DA SILVA, João Paulo Sousa et al. Carvão ativado oriundo do mesocarpo do fruto da castanha de caju (*Anacardium occidentale*) na remoção de corante em meio aquoso. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. 21710313221-21710313221, 2021.

DENIZ, F. An economical and effective alternative to commercial activated carbon for treatment of synthetic dye pollution in aquatic environment: surfactant modified waste product of *Zostera marina*. **International Journal of Phytoremediation**, v. 23, n. 5, p. 530–538, 2021. DOI: 10.1080/15226514.2020.1833301.

DENIZ, F.; YILDIZ, H. Taguchi DoE methodology for modeling of synthetic dye biosorption from aqueous effluents: parametric and phenomenological studies. **International Journal of Phytoremediation**, v. 21, n. 11, p. 1065–1071, 2019. DOI: 10.1080/15226514.2019.1594687.

ELDOMIATY, N.; ELBAYOUMY, E.; ABOELNGA, M. M.; MOSTAFA, M. R. Repurposing waste plastic into a sustainable adsorbent for removing synthetic dye: experimental, optimization and theoretical modeling. **RSC Advances**, v. 16, n. 2, p. 1008–1029, 2026. DOI: 10.1039/d5ra08601a.

GEETHAKARTHI, A.; PHANIKUMAR, B. R. Characterization of tannery sludge activated carbon and its utilization in the removal of azo reactive dye. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 19, n. 3, p. 656–665, 2012. DOI: 10.1007/s11356-011-0608-z.

GHANBARI, S.; FATEHIZADEH, A.; KHIADANI, M.; TAHERI, E.; IQBAL, H. M. N. Treatment of synthetic dye containing textile raw wastewater effluent using UV/Chlorine/Br photolysis process followed by activated carbon adsorption. **Environmental Science and Pollution**

Research, v. 29, n. 26, p. 39400–39409, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-18860-5.

HARTZ, Taís Port. **Carvão da Casca de Beterraba ativado como suporte para Nanopartículas de Fe₃O₄: Síntese, Caracterização e Aplicação na Remoção do corante verde brilhante**. 2023. Dissertação de Mestrado.

JOTHIMANI, R.; SANTHI, M. Study on the adsorption of malachite green from aqueous solutions using activated carbon prepared from *Corallocarpus epigaeus*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, n. 29, p. 17824–17841, 2025. DOI: 10.1007/s11356-025-36710-y.

LOPES, Greice KP et al. Steam-activated carbon from malt bagasse: Optimization of preparation conditions and adsorption studies of sunset yellow food dye. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 14, n. 3, p. 103001, 2021.

MONDAL, P.; MUKHERJI, S.; GARG, A. Performance of treatment schemes comprising chromium-hydrogen peroxide-based advanced oxidation process for textile wastewater. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 58, p. 88089–88100, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-21629-5.

MOOSAVI, Seyedehmaryam et al. Application of efficient magnetic particles and activated carbon for dye removal from wastewater. **ACS omega**, v. 5, n. 33, p. 20684-20697, 2020.

PARIMELAZHAGAN, V.; YASHWATH, P.; ARUKKANI PUSHPARAJAN, D.; CARPENTER, J. Rapid removal of toxic Remazol Brilliant Blue-R dye from aqueous solutions using *Juglans nigra* shell biomass

activated carbon as potential adsorbent: optimization, isotherm, kinetic, and thermodynamic investigation. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 20, p. 12484, 2022. DOI: 10.3390/ijms232012484.

RIBAS, Marielen Cozer. Remoção de corantes têxteis pelo processo de adsorção utilizando carvão ativado produzido a partir de subprodutos agroindustriais: estudos em batelada e coluna de leito fixo. 2016.

SANTOS, Danilo Henrique da Silva et al. Avaliação da eficiência dos processos oxidativos avançados na regeneração de carvão ativado saturado com poluente orgânico. 2021.

SCHMIDT, Luiz Fernando et al. Avaliação da remoção da concentração de Diclofenaco de sódio em solução aquosa através do processo de adsorção utilizando carvão ativado proveniente de folhas de abacateiro (*Persea americana* Mill.). 2022.

SEIDMOHAMMADI, A. et al. A comparative study for the removal of methylene blue dye from aqueous solution by novel activated carbon based adsorbents. 2019.

ZHANG, J.; ZHANG, N.; TACK, F. M. G.; SATO, S.; ALESSI, D. S.; OLESZCZUK, P.; WANG, H.; WANG, X.; WANG, S. Modification of ordered mesoporous carbon for removal of environmental contaminants from aqueous phase: a review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 418, p. 126266, 2021. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126266.