



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

LUÍS VINÍCIUS LIMA SOARES

**ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS ADSORVENTES, CONVENCIONAIS E
ALTERNATIVAS, APLICADAS NO TRATAMENTO DE ESGOTOS PARA REMOÇÃO
DE FÓSFORO**

PAU DOS FERROS

2025

LUÍS VINÍCIUS LIMA SOARES

**ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS ADSORVENTES, CONVENCIONAIS E
ALTERNATIVAS, APLICADAS NO TRATAMENTO DE ESGOTOS PARA REMOÇÃO
DE FÓSFORO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito para a obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Jacineumo Falcão de Oliveira, Prof.
Dr.

Co-orientador: Thainara de Souza Antônio, Me.

PAUDOS FERROS/RN

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S676a Soares, Luís Vinícius Lima.
Análise das tecnologias adsorventes,
convencionais e alternativas, aplicadas no
tratamento de esgotos para remoção de fósforo / Luís
Vinícius Lima Soares. - 2025.
82 f. : il.

Orientador: Jacineumo Falcão de Oliveira.
Coorientadora: Thainara de Souza Antônio.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Adsorção. 2. Remoção de Fósforo. 3. Materiais
Modificados. 4. Óxidos Metálicos. 5. Águas
Residuárias.. I. Oliveira, Jacineumo Falcão de,
orient. II. Antônio, Thainara de Souza , co-
orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).
Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LUÍS VINÍCIUS LIMA SOARES

**ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS ADSORVENTES, CONVENCIONAIS E
ALTERNATIVAS, APLICADAS NO TRATAMENTO DE ESGOTOS PARA REMOÇÃO
DE FÓSFORO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, , como requisito para a obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 12 / 12 / 2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JACINEUMO FALCAO DE OLIVEIRA**
Data: 17/12/2025 17:06:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jacineumo Falcão de Oliveira, Prof. Dr (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **THAINARA DE SOUZA ANTONIO**
Data: 18/12/2025 08:46:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Thainara de Souza Antônio, MSc. (UFV) Membro
Examinador

Documento assinado digitalmente
 **WILZA DA SILVA LOPES**
Data: 17/12/2025 18:23:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Wilza da Silva Lopes, Profa. Dra. (UFERSA) Membro
Examinador

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO NERIS RODRIGUES**
Data: 18/12/2025 09:04:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fernando Neris Rodrigues, Prof. Dr. (UEMG) Membro
Examinador

DEDICATÓRIA

A meu avô, Janduir Celestino de Lima (*in memoriam*) que sempre me auxiliou e me guiou para as boas condutas. Sempre será um exemplo a ser seguido e minha fonte de inspiração. Obrigado por tudo.

Dedico a todos que colaboraram para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de demonstrar minha imensa gratidão à Deus, pai, todo poderoso. Posteriormente, agradecer a mim mesmo por jamais ter pensado em desistir, mesmo perante as adversidades, por não me importar com a opinião de gente alheia, por não deixar os fatores externos afetarem o meu desempenho.

Gostaria também de agradecer à minha família pelo apoio contínuo e por acreditar no meu potencial, em especial, minha mãe, Joana Darc e minha tia, Danúbia. Isso foi essencial durante a caminhada.

Agradeço também aos meus colegas, que se tornaram amigos durante o passar do curso, que contribuíram com meu aprendizado durante esse processo de 4 anos e meio, que de forma direta e indireta, colaboraram para que essa meta fosse concluída. Seria injusto de minha parte citar nomes, para não acabar esquecendo de alguém.

Um agradecimento especial à minha namorada Danubia Aniele, a qual, chegou na reta final deste trajeto, mas se tornou um pilar com suas contribuições diárias. Sua presença ao meu lado torna tudo mais leve, e sou extremamente grato por ter você neste processo.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Dr. Jacineumo Falcão de Oliveira, sua sabedoria e orientações precisas, foram cruciais para o andar deste trabalho. Seu comprometimento para o desenvolvimento deste trabalho foi essencial nesta etapa. Serei eternamente grato pelas dicas e conselhos contínuos.

Agradeço ao Grupo de Estudo e Pesquisa em Qualidade de Água, Tratamento e Reúso de Efluentes (GEPAE UFERSA).

Por fim, agradeço ao curso de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da UFERSA, campus Pau dos Ferros.

ÉPIGRAFE

“Nosso maior medo não é sermos inadequados, nosso maior medo é de sermos poderosos além da conta, é nossa luz e não nossa obscuridade que mais nos apavora, ser pequeno não serve ao mundo, não há nada de sábio em se encolher para que as outras pessoas não se sintam inseguras ao seu redor nos todos fomos feitos para brilhar como crianças não está apenas em algum de nós, está em todos e na medida em que deixarmos nossa luz brilhar nos inconscientemente damos as outras pessoas a permissão pra fazer o mesmo na medida em que nos liberamos dos nossos medos nossa presença automaticamente libera os outros.”

Rick Gonzalez (Timo Cruz)

RESUMO

A crescente necessidade de tratamento de águas residuárias para remoção de fósforo (P) impulsiona o estudo da adsorção, comparando o desempenho de materiais convencionais e alternativos. Adsorventes convencionais, como o carvão ativado e a zeólita natural, mantêm-se como referência devido à sua vasta disponibilidade e histórico de aplicações. O carvão ativado demonstra elevada eficiência de remoção, alcançando até 99,94% em pH 7, embora com capacidades máximas de adsorção ($q_{\max}$) relativamente baixas. Em contraste, os adsorventes alternativos e híbridos, majoritariamente baseados em biochar, argilas modificadas e hidróxidos duplos em camadas (LDHs), destacam-se pela viabilidade econômica, menor impacto ambiental e capacidades de adsorções significativamente superiores. O lantânio (La) é o metal mais eficiente devido à sua forte afinidade pelo íon fosfato, resultando nos melhores desempenhos, como o biochar de lodo de esgoto modificado com lantânio (La-SSBC), que atingiu a capacidade máxima de 312,55 mg/g. Outras modificações eficazes envolvem ferro (Fe), magnésio (Mg) e cálcio (Ca). Os mecanismos predominantes de adsorção são a complexação de esfera interna, atração eletrostática, troca iônica e precipitação superficial. As condições operacionais exercem influência crítica no desempenho. A remoção de fósforo é favorecida em faixas de pH neutras a levemente ácidas de 6 a 7, sendo o processo dificultado em pH alcalino devido à repulsão eletrostática. O aumento da concentração inicial de fósforo, para acima de 10 mg/L, geralmente aprimora a capacidade de adsorção. Os modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich são os mais aplicados na modelagem da adsorção, ajustando-se de forma mais proeminente aos materiais modificados. Um aspecto crucial para a sustentabilidade da tecnologia é o potencial de regeneração e reaproveitamento. Muitos materiais híbridos, como aqueles modificados com lantânio, ferro ou cálcio, demonstram alta estabilidade cíclica, mantendo eficiências satisfatórias acima dos 80%, mesmo após múltiplos ciclos. A regeneração não apenas permite a reutilização do adsorvente, mas também viabiliza a recuperação do fósforo adsorvido para aplicação como fertilizante de liberação lenta na agricultura. Sistemas inovadores, como o MAAC/AEM//CEM/AC, também demonstram capacidade de concentrar o P recuperado em até 189%. Apesar dos resultados promissores em laboratório, a transição tecnológica é desafiada pela baixa padronização metodológica entre os estudos, que dificulta a comparação direta de resultados de eficiência e capacidade. Além disso, a maioria das investigações de regeneração se limita a curto prazo (três a cinco ciclos), sendo insuficientes para atestar a viabilidade econômica e a estabilidade estrutural em longo prazo. Assim, as perspectivas futuras enfatizam a necessidade de integrar a adsorção a tecnologias híbridas e validar o desempenho dos adsorventes em escalas piloto e arranjos contínuos, garantindo a escalabilidade e a pertinência das soluções para cenários reais.

Palavras-Chave: adsorção; remoção de fósforo; materiais modificados; óxidos metálicos; águas residuárias.

ABSTRACT

The growing need for wastewater treatment to remove phosphorus (P) drives the study of adsorption, comparing the performance of conventional and alternative materials. Conventional adsorbents, such as activated carbon and natural zeolite, remain the benchmark due to their wide availability and history of applications. Activated carbon demonstrates high removal efficiency, reaching up to 99.94% at pH 7, although with relatively low maximum adsorption capacities ($q_{\max}$). In contrast, alternative and hybrid adsorbents, mostly based on biochar, modified clays, and layered double hydroxides (LDHs), stand out for their economic viability, lower environmental impact, and significantly superior adsorptive capacities. Lanthanum (La) is the most efficient metal due to its strong affinity for the phosphate ion, resulting in top performance, such as lanthanum-modified sewage sludge biochar (La-SSBC), which achieved a maximum capacity of 312.55 mg/g. Other effective modifications involve iron (Fe), magnesium (Mg), and calcium (Ca). The predominant adsorption mechanisms are inner-sphere complexation, electrostatic attraction, ion exchange, and surface precipitation. Operating conditions exert a critical influence on performance. Phosphorus removal is favored in neutral to slightly acidic pH ranges of 6 to 7, with the process being hindered at alkaline pH due to electrostatic repulsion. Increasing the initial phosphorus concentration to above 10 mg/L generally improves adsorption capacity. The Langmuir and Freundlich isothermal models are the most widely used in adsorption modeling, fitting modified materials most prominently. A crucial aspect for the sustainability of the technology is its potential for regeneration and reuse. Many hybrid materials, such as those modified with lanthanum, iron, or calcium, demonstrate high cyclic stability, maintaining satisfactory efficiencies above 80%, even after multiple cycles. Regeneration not only allows for the reuse of the adsorbent but also enables the recovery of adsorbed phosphorus for application as a slow-release fertilizer in agriculture. Innovative systems, such as MAAC/AEM/CEM/AC, also demonstrate the ability to concentrate recovered P by up to 189%. Despite promising laboratory results, the technological transition is challenged by low methodological standardization among studies, which hinders direct comparison of efficiency and capacity results. Furthermore, most regeneration studies are limited to the short term (three to five cycles), which is insufficient to attest to long-term economic viability and structural stability. Thus, future perspectives emphasize the need to integrate adsorption with hybrid technologies and validate the performance of adsorbents at pilot scales and continuous arrays, ensuring the scalability and relevance of solutions for real-world scenarios.

Keywords: adsorption; phosphorus removal; modified materials; metal oxides; wastewater.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das estratégias de pesquisa bibliográfica na base de dados Scopus.....	36
Figura 2 - Tendência de publicações nos últimos anos sobre adsorção de fósforo de águas residuárias	39
Figura 3 - Tendência de publicações nos últimos anos sobre adsorção de fósforo de águas residuárias associadas ao tipo de adsorvente.....	40
Figura 4 - Ocorrência de artigos por países publicados nos últimos 5 anos e nuvem de palavras-chaves sobre adsorção de fósforo e águas residuárias	41
Figura 5 -Análise de rede de coocorrência de palavras-chave sobre esgoto adsorção de fósforo e águas residuárias usando o software VOSviewer	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Tecnologias convencionais para adsorção de P.	44
Tabela 2 - Tecnologias alternativas para adsorção de P.....	45
Tabela 3 - Tecnologias alternativas e convencionais para adsorção de P.	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
ETEs	Estações de Tratamento de Esgoto
CMPF	Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
N	Nitrogênio
P	Fósforo
Al	Alumínio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
pH	Potencial hidrogeniônico
PO_4^{3-}	Fosfato
H_2PO_4^-	Ácido fosfórico
mg/L	Concentração
q_{max}	Capacidade máxima de adsorção
ETARs	Estações de tratamento de águas residuárias
GAC	Carvão ativado granular
PAC	Carvão ativado em pó
$\mu\text{g/g}$	Microgramas por grama
SRP	Fósforo reativo solúvel
ESBC	Biochar enriquecido com casca de ovo
LDHs	Hidróxidos duplos em camadas
HFO	Hidróxido férrico hidratado
FTIR	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
Zr	Zircônio
LZ	Zeólita natural modificada com lantânio
LMZ	Zeólita magnética modificada com lantânio
NAC	Material de eletrodo de carbono ativado dopado com nitrogênio
MMBC	Biochar magnético dopado com óxido de magnésio
MgO	Óxido de magnésio

Mg	Magnésio
Ca-PSB2	Biochar carregado de cálcio (Ca) tipo 2
LMB/La ₂ (CO ₃) ₃ /MnFe ₂ O ₄]	Composto de biocarvão (LMB) carregado com carbonato de lantânio (La ₂ (CO ₃) ₃) e ferrita de manganês (MnFe ₂ O ₄)
LMB	Composto debiocarvão
La(CO ₃) ₃	Carbonato de lantânio
La	Lantânio
MnFe ₂ O ₄	Ferrita de manganês
MBC	Biochar modificado
LDH/PMA/BC	Biochar junto à argilas modificadas e LDH
B-Zn/Al-LDH-1	Biochar derivado de talo de milho com diversas formas de hidróxidos duplos lamelares modificados com zinco e alumínio
B-Mg/Al-LDH-1	Biochar derivado de talo de milho com diversas formas de hidróxidos duplos lamelares modificados com magnésio e alumínio
LCB300	Carbonato de lantânio/biochar
LHB800	Hidróxido de lantânio/biochar
FBC600	Biochar magnético a partir de resíduos de casca de caranguejo
gBC600-4B	Biochar carregado com ferro (Fe) e cálcio (Ca)
Fe	Ferro
Ca	Cálcio
FLO@CSL	Biochar de lignina sulfonilmetilada modificada com lantânio-ferro bimetalico magnético
BC20	Biochar com 20% de óxido de cálcio (CaO)
CaO	Biochar à base de lodo ativado residual (WAS) impregnado com cloreto de ferro III (FeCl ₃)
MB3	
WAS	Lodo ativado residual
FeCl ₃	Cloreto de ferro III
EB 2:1	Biochar à base de casca de ovo modificado na proporção 2:1
MBAC4	Quarta amostra de um carvão ativado derivado de um biochar modificado
nano-CaO ₂ /BC	Nanopartículas de peróxido de cálcio (CaO ₂) carregadas com biocarvão poroso (BC)
BC	Biocarvão poroso
CaO ₂	Peróxido de cálcio
VBC600	Biochar de origem vegetal preparado à 600°C

La-TC	Biochar de fibra de plátano modificado com lantânio
La-SSBC	Biochar de lodo de esgoto projetado com hidróxido de lantânio (La-OH)
La(OH) ₃	Hidróxido de lantânio
La-600SS-OH	Biochar de lodo de esgoto à 600 °C modificado com hidróxido de lantânio
La-MB	Biochar de platina modificado com La(OH) ₃ magnético fraco
MgO-PMBC	Biochar de esterco suíno modificado com óxido de magnésio (MgO)
MBC/Mg-La-3	Biochar magnético modificado com magnésio e lantânio
CMBC	Biochar eficiente de borra de café co-modificado com cálcio (Ca) e magnésio (Mg)
Fe/N@BC	Biochar modificado com ferro e nitrogênio
BC-γ-Fe ₂ O ₃ /MgO	Biochar modificado com óxido de ferro III e óxido de magnésio
SDAC-La/Mg	Carvão ativado de esterco de ovelha modificado a lantânio e magnésio
ZnBC-OH	Biochar modificado por zinco preparado por pirólise de biomassa mediada por metais com imersão alcalina
Fe-MnBC	Biochar modificado com ferro e mangânes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	Objetivo geral	18
2.2	Objetivos específicos.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	Crescimento populacional e recursos hídricos	19
3.2	Produção de águas residuárias.....	20
3.3	Potencial contaminante das águas residuárias.....	21
3.4	Relação entre fósforo e eutrofização	22
3.5	Uso da adsorção para remoção de fósforo.....	25
3.6	Fatores que influenciam a adsorção de fósforo.....	26
3.7	Materiais adsorventes convencionais e alternativos	28
3.7.1.	Materiais Convencionais	28
3.7.2.	Materiais Alternativos	29
3.8	Mecanismos e critérios de adsorção na remoção de fósforo	30
3.8.1.	Mecanismos de Adsorção de Fósforo	30
3.8.2.	Capacidade Máxima de Adsorção.....	33
3.8.3.	Modelagem da Adsorção	34
4	METODOLOGIA.....	36
4.1	Tipo e escopo do estudo	36
4.2	Estratégia e critério de pesquisa	37
4.3	Seleção das informações.....	37
4.4	Sintetização e análise dos dados	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	Tendências de publicação na temática da adsorção de fósforo	39
5.2	Aplicação de adsorventes convencionais para remoção de fósforo	49
5.3	Aplicação de adsorventes alternativos para remoção de fósforo.....	52
5.4	Mecanismos predominantes no processo de adsorção	56
5.5	Influência das condições operacionais no desempenho dos adsorventes	61
5.6	Principais modelagens isotérmicas e cinéticas nos estudos de adsorção de fósforo	66
5.7	Potencial de regeneração e reaproveitamento dos adsorventes.....	71
5.8	Perspectivas futuras e lacunas de pesquisa identificadas	73
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A crescente intensificação das atividades humanas, especialmente as agrícolas, industriais e urbanas tem gerado significativas cargas de P nos corpos hídricos, contribuindo para a eutrofização artificial, um dos principais problemas ambientais globais relacionados à qualidade da água. Esse fenômeno, caracterizado pela proliferação excessiva de algas e cianobactérias devido ao excesso de nutrientes, reduz drasticamente o oxigênio dissolvido, prejudica a biodiversidade aquática, compromete o uso múltiplo da água e impõe desafios à saúde pública (von Sperling, 2014). Nesse contexto, o tratamento de esgotos domésticos e industriais adquire papel central na contenção da carga fosfatada, sobretudo em países com déficits históricos de saneamento básico.

Embora processos como a precipitação química e as tecnologias de membranas sejam reconhecidamente eficazes na remoção de P, eles apresentam limitações operacionais, altos custos e sensibilidade a variações na composição dos efluentes, o que restringe sua aplicabilidade em sistemas descentralizados ou de pequeno porte. Em contraposição, a adsorção surge como uma alternativa tecnicamente promissora, pela sua simplicidade operacional, versatilidade, baixo custo relativo e potencial de regeneração dos materiais adsorventes (Lia *et al.*, 2023). Entretanto, a eficiência da adsorção está diretamente condicionada à natureza físico- química do material utilizado, o que torna a escolha do adsorvente um fator crítico para o sucesso do processo.

Tradicionalmente, materiais como o carvão ativado granular (GAC), o carvão ativado em pó (PAC) e o antracito têm sido amplamente empregados nos sistemas de purificação e tratamento de água, ainda que com limitações em relação à afinidade com o íon fosfato. Por essa razão, a comunidade científica e o setor tecnológico vêm ampliando os estudos sobre adsorventes alternativos, naturais ou sintéticos, muitos dos quais originados de resíduos orgânicos, subprodutos industriais ou materiais de baixo custo. Entre os principais, destacam-se o biochar, as argilas modificadas, resíduos de concreto, as escórias siderúrgicas, os óxidos metálicos, e até mesmo resíduos não convencionais como a casca de ovo, todos com potenciais distintos de adsorção, sustentabilidade e aplicabilidade (Moharami *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2022; Biswas *et al.*, 2023; Trivedi *et al.*, 2025).

Nesse sentido, têm-se a necessidade de elencar os principais fatores que influenciam a eficiência do processo adsorptivo, reconhecendo que variáveis ambientais e operacionais exercem papel determinante no desempenho dos sistemas de tratamento. Ao considerar esses aspectos de maneira integrada, pretende-se fornecer uma base teórica que auxilie na interpretação dos resultados observados em diferentes estudos e cenários de aplicação. Tal

como, visualizar as características gerais dos materiais adsorventes empregados na remoção de fósforo, contemplando tanto os adsorventes convencionais quanto os alternativos, amplamente investigados na literatura recente. Isso contribui para a seleção mais adequada de materiais e estratégias de tratamento em função das demandas ambientais e operacionais.

Essa diversidade de materiais, contudo, levanta uma questão fundamental: quais critérios devem orientar a seleção do adsorvente ideal para remoção de fósforo em diferentes contextos de tratamento de esgotos? A resposta a essa pergunta exige uma compreensão aprofundada dos mecanismos que regem a adsorção, como trocas iônicas, complexação química, precipitação superficial e interações físicas, bem como das condições ambientais e operacionais que influenciam o processo, como pH, temperatura, tempo de contato, concentração inicial de fósforo e interferência de outros íons. Além disso, o desempenho de cada material deve ser analisado por meio de modelagens matemáticas - como as isotermas de Langmuir e Freundlich e os modelos cinéticos - e de critérios operacionais, como a capacidade máxima de adsorção (q_{max}), a taxa de remoção e o potencial de regeneração.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar criticamente, por meio de revisão sistemática, o desempenho e os mecanismos de ação de adsorventes convencionais e alternativos na remoção de fósforo de esgotos.

2.2 Objetivos específicos

- Apresentar os principais fatores que influenciam a eficiência da adsorção, como pH, temperatura, tempo de contato, concentração de fósforo e presença de íons interferentes;
- Identificar as caracterizações dos diferentes tipos de materiais adsorventes, incluindo os convencionais (ex: carvão ativado, antracito) e os alternativos (ex: biochar, casca de ovo, argilas modificadas e metais otimizadores);
- Comparar o desempenho dos materiais adsorventes com base em estudos experimentais disponíveis na literatura, considerando capacidade de adsorção, taxa de remoção e potencial de regeneração;
- Descrever os principais mecanismos de adsorção e modelos de avaliação aplicados nos estudos, como trocas iônicas, complexação química, isothermas de Langmuir e Freundlich, e modelos cinéticos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Crescimento populacional e recursos hídricos

O crescimento populacional acelerado nas últimas décadas tem provocado significativas transformações no meio ambiente, especialmente no que tange aos recursos hídricos. À medida que as cidades se expandem e a ocupação humana avança, aumentam proporcionalmente a demanda por água e a geração de esgoto, colocando em risco a qualidade e disponibilidade desse recurso vital. Esse processo, quando não acompanhado por planejamento ambiental e saneamento básico eficaz, contribui diretamente para a degradação de bacias hidrográficas, rios e mananciais (Medeiros *et al.*, 2024).

Segundo Sette Júnior (2016), a expansão urbana, frequentemente desordenada, resulta na intensificação da geração de esgotos domésticos e industriais, além do aumento da impermeabilização do solo, o que altera o escoamento superficial e afeta diretamente o regime hidrológico das bacias hidrográficas. Esse fenômeno agrava a poluição dos corpos hídricos e compromete a renovação natural da água. Ainda segundo os autores, a má gestão dos resíduos urbanos, especialmente o esgoto doméstico não tratado, é apontada como um dos principais agentes poluentes dos cursos d'água, como observado nas sub-bacias dos rios Capivari e Mortes.

Além disso, a análise hidro morfológica e da qualidade da água dos ribeirões Espera e Araras, realizada por Rios (2020), destaca que as alterações na morfologia dos canais e nos índices de qualidade da água também estão fortemente relacionadas ao uso e ocupação do solo, intensificados pelo crescimento urbano não planejado, bem com evidenciando que áreas mais antropizadas apresentaram maiores índices de coliformes fecais, sedimentos e nutrientes, indicadores típicos de poluição por esgoto doméstico.

O problema se torna ainda mais crítico quando se observa que, em muitos municípios brasileiros, os serviços de coleta e tratamento de esgoto não acompanham o ritmo de crescimento das populações urbanas. De acordo com Tucci (2009), o saneamento básico, principalmente o tratamento de esgotos, não evoluiu na mesma proporção da urbanização, resultando em comprometimento da saúde pública e da qualidade ambiental. O autor alerta que essa discrepância agrava as desigualdades sociais e ambientais, concentrando os impactos negativos nas regiões periféricas e nas áreas de mananciais.

Além disso, o crescimento populacional exerce pressão direta sobre a captação de água, reduzindo a disponibilidade dos recursos hídricos e comprometendo sua qualidade. O uso excessivo e a poluição tornam os sistemas hídricos mais vulneráveis às secas, enchentes e à

perda de biodiversidade aquática. Conforme pontua o relatório Recursos Hídricos no Brasil e no Mundo (Cunha, 2014), “a água doce disponível para consumo humano é limitada e sua má gestão tem levado a conflitos pelo uso da água, poluição generalizada e escassez em diversas regiões”.

Portanto, é evidente que a relação entre crescimento populacional e recursos hídricos é marcada por um ciclo de retroalimentação negativa: quanto maior a população, maior a geração de esgoto e, por consequência, mais graves os impactos sobre a qualidade da água e o funcionamento dos ecossistemas aquáticos. Superar esse desafio requer políticas públicas integradas, investimentos em saneamento básico, educação ambiental e planejamento urbano sustentável, de modo a proteger os recursos hídricos para as presentes e futuras gerações.

3.2 Produção de águas residuárias

A crescente urbanização, associada ao aumento populacional e à industrialização, tem elevado significativamente a geração de águas residuárias no Brasil e em diversos países em desenvolvimento. As águas residuárias, ou esgotos, representam um dos maiores desafios ambientais da atualidade, devido à sua complexidade química, volume gerado e impacto direto sobre os corpos d’água quando não tratados adequadamente.

No Brasil, a situação é particularmente preocupante. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), o país gera mais de 6,7 bilhões de metros cúbicos (m³) de esgoto por ano, porém apenas 55,8% deste volume é tratado. Isso significa que quase metade dos esgotos coletados ainda é lançada in natura no meio ambiente. Ainda pior: apenas 54% da população brasileira é atendida com rede de coleta de esgoto, o que indica que milhões de brasileiros sequer têm acesso a serviços básicos de saneamento.

Essa realidade reflete gargalos estruturais e históricos na política de saneamento do país, especialmente em áreas periféricas e em pequenos municípios, onde a infraestrutura é precária e os investimentos públicos são escassos. De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023), “o lançamento de esgotos sem tratamento em corpos d’água superficiais é a principal fonte de poluição difusa nos rios urbanos brasileiros”. A agência ainda aponta que em 2022, cerca de 2.700 municípios brasileiros ainda despejavam esgoto diretamente em rios, lagos e córregos, agravando a contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

Além da baixa cobertura de coleta e tratamento, o Brasil enfrenta desafios relacionados à ineficiência dos sistemas convencionais de tratamento. Muitas estações de tratamento de esgoto (ETEs) operam com tecnologias defasadas, com baixo desempenho em remover

nutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P), e são frequentemente afetadas por falhas operacionais e falta de manutenção adequada. Isso compromete a qualidade do efluente final e reduz a efetividade do tratamento.

A variedade de sistemas para tratamento de efluentes abrange abordagens físicas, químicas e biológicas com desempenhos bastante distintos em relação à remoção de fósforo. Processos biológicos do tipo EBPR (Enhanced Biological Phosphorus Removal), integrados em lodos ativados e reatores de batelada, conseguem frequentemente remover mais de 80 a 90% do fosfato quando bem projetados (Abdoli *et al.*, 2024)

Outras rotas incluem sistemas de tratamento por zonas húmidas construídas, que em ensaios piloto e revisões têm apresentado ampla variabilidade de aproximadamente 40% até picos relatados entre 73% e 95% de remoção total de fósforo dependendo do desenho e manejo das macrófitas (Baldovi *et al.*, 2021). Processos avançados como membranas em biorreatores, especialmente quando combinados com etapas de pós-tratamento (adsorção ou coagulação), podem reduzir fósforo dissolvido (Lee *et al.*, 2019).

Mesmo com esses dados, a situação ainda é delicada em países em desenvolvimento de forma geral. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2023), mais de 80% das águas residuárias geradas no mundo são descartadas sem tratamento, sendo os países mais pobres os maiores contribuintes para essa estatística. Nessas regiões, os investimentos em saneamento são insuficientes diante das crescentes demandas populacionais e urbanas (ONU, 2023).

A consequência direta dessa realidade é o comprometimento da qualidade dos recursos hídricos. As águas residuárias possuem um alto potencial contaminante, contendo matéria orgânica, nutrientes, metais pesados, patógenos e microplásticos. Quando lançadas sem tratamento em corpos d'água, elas promovem a eutrofização, a degradação da biodiversidade aquática, a redução da oxigenação e o aumento dos riscos à saúde pública. Como alerta a ANA (2023), “os corpos d'água tornam-se vetores de doenças e deixam de cumprir funções ecológicas e econômicas essenciais”.

3.3 Potencial contaminante das águas residuárias

As cargas orgânicas presentes nos esgotos são geralmente expressas por indicadores como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). A DBO representa a quantidade de oxigênio necessária para a degradação da matéria orgânica por

microrganismos aeróbicos, enquanto a DQO quantifica a matéria orgânica total oxidável, incluindo compostos não biodegradáveis. Segundo von Sperling (2014), “valores elevados de DBO e DQO nos esgotos lançados nos cursos d’água reduzem drasticamente o oxigênio dissolvido, provocando morte de peixes e outros organismos aeróbicos”. Essa condição leva a um processo de eutrofização e transforma os corpos hídricos em ambientes hostis à vida.

Além da carga orgânica, os esgotos domésticos são ricos em nutrientes, especialmente N e P. Quando despejados sem tratamento, esses nutrientes promovem o crescimento excessivo de algas e cianobactérias, o que compromete a qualidade da água e altera o equilíbrio trófico dos ecossistemas. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023) destaca que “a presença de fósforo em concentrações elevadas é o principal fator responsável pela aceleração da eutrofização em lagos e reservatórios”.

Outro grupo de contaminantes presentes nos esgotos domésticos são os microrganismos patogênicos, como bactérias (*E. coli*, *Salmonella*), vírus e protozoários (*Giardia*, *Cryptosporidium*). Esses agentes causadores de doenças entéricas são responsáveis por surtos de infecções quando há contato com águas contaminadas ou seu consumo. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022), cerca de 829 mil mortes anuais no mundo estão relacionadas à ingestão de água insalubre, muitas delas associadas à presença de esgoto doméstico nos mananciais.

Compostos como fármacos, hormônios, microplásticos e surfactantes são classificados como poluentes emergentes. Segundo Clara *et al.* (2023), esses poluentes são frequentemente encontrados em efluentes domésticos e resistem aos processos convencionais de tratamento. Avivari *et al.* (2022) aponta a presença de antibióticos, anticoncepcionais e microplásticos em concentrações ambientalmente relevantes, reforçando a necessidade de tratamentos avançados, como ozonização e processos oxidativos. As consequências ambientais diretas do despejo de esgoto doméstico são múltiplas e preocupantes: mortandade da fauna aquática, desequilíbrio trófico, redução da biodiversidade, além da contaminação dos aquíferos, especialmente quando há infiltração de esgoto bruto em solos permeáveis. A contaminação de lençóis freáticos representa um risco severo para o abastecimento humano e é de difícil reversão (Avivari *et al.*, 2022).

Diante da complexidade dos contaminantes presentes nos esgotos domésticos, destaca-se a importância de se observar com atenção especial a presença do fósforo, um dos principais parâmetros de interesse ambiental e sanitário. Como afirma Esteves (2011), “o fósforo é o nutriente limitante mais importante em sistemas lênticos (lagos e reservatórios) e o seu controle é essencial para a prevenção da eutrofização”. O foco no fósforo como elemento-chave na

degradação da qualidade da água abre possibilidades para abordagens mais específicas e eficientes de tratamento, como remoção química ou biológica do nutriente em ETEs.

3.4 Relação entre fósforo e eutrofização

A eutrofização de corpos d'água é um dos principais problemas ambientais enfrentados em regiões urbanizadas e com intensa atividade agrícola. Este fenômeno ocorre, em grande parte, devido ao excesso de nutrientes, principalmente o fósforo (P), que entra nos sistemas aquáticos por meio de esgotos domésticos, efluentes industriais e águas pluviais contaminadas (von Sperling, 2014). O fósforo, ao atuar como nutriente limitante, torna-se o principal catalisador do processo de eutrofização, especialmente em águas lânticas, onde a renovação da água é mais lenta (Esteves, 2011).

A eutrofização pode ser classificada em natural ou antrópica, conforme a origem dos nutrientes que desencadeiam o processo. Segundo Esteves (2011), a eutrofização natural é um processo evolutivo que ocorre ao longo de milhares de anos, no qual os corpos d'água acumulam, de forma gradual, matéria orgânica e nutrientes oriundos da bacia hidrográfica. Essa acumulação lenta contribui para o aumento da produtividade primária, sem, necessariamente, causar colapsos ecológicos.

A eutrofização causada por atividades humanas tem se intensificado com o incremento acelerado de nutrientes nos corpos hídricos, sendo o fósforo apontado como o principal agente desse processo. Akinawo (2023) destaca que “a eutrofização é reconhecida como um desafio ecológico que causa efeitos adversos nos ecossistemas aquáticos e prejudica o abastecimento de água potável”. Os insumos antrópicos de fósforo estão entre os principais responsáveis por florações prejudiciais e a consequente redução do oxigênio dissolvido, prejudicando a biodiversidade aquática (Hordones *et al.*, 2022).

As águas residuárias, principalmente aquelas oriundas de áreas urbanas com tratamento de esgoto ineficiente ou inexistente, representam uma das principais fontes de fósforo para os corpos hídricos (Tucci, 2009). Detergentes, fezes, urina e efluentes industriais contribuem para a carga total de fósforo que chega aos sistemas aquáticos diariamente.

O fósforo é reconhecido como o principal nutriente limitante nos ecossistemas de água doce. De acordo com Schindler (1977), a limitação de fósforo é o principal fator que regula o crescimento de algas e fitoplâncton em lagos e reservatórios. Em seus experimentos no Canadá, Schindler demonstrou que a adição de fósforo, mesmo sem N, foi suficiente para provocar intensas florações de algas. Esteves (2011) reforça que “a adição de pequenas quantidades de fósforo em ambientes aquáticos lânticos é capaz de provocar alterações

significativas na estrutura e funcionamento desses ecossistemas”.

Em águas residuárias, o fósforo está frequentemente presente na forma de ortofosfato, que é altamente biodisponível para o fitoplâncton. Além disso, muitos sistemas de tratamento de esgoto convencionais (secundários) não são projetados para remover eficientemente o fósforo. Segundo Tucci (2009), “às estações de tratamento brasileiras, em geral, não possuem etapas específicas de remoção de fósforo, o que torna os efluentes uma importante fonte difusa de nutrientes”.

Vários corpos d’água no Brasil enfrentam problemas de eutrofização diretamente relacionados ao excesso de fósforo oriundo de águas residuárias. Um exemplo emblemático é o Lago Paranoá, em Brasília (DF). Branco et al (2010) identificaram concentrações elevadas de fósforo total em diversas partes do lago, associadas ao lançamento de efluentes urbanos tratados e não tratados. As florações de cianobactérias, especialmente do gênero *Microcystis*, têm sido recorrentes, comprometendo o uso recreativo e o abastecimento.

Outro caso relevante é o da Represa Guarapiranga, em São Paulo, que abastece milhões de pessoas. Tundisi e Tundisi (2008) apontam que a ocupação desordenada da bacia e o lançamento de esgotos clandestinos têm contribuído para a elevação dos níveis de fósforo, favorecendo o crescimento descontrolado de algas e a perda de qualidade da água.

Na Lagoa da Pampulha, em Belo Horizonte (MG), a situação também é crítica. Estudos demonstram que o aporte contínuo de águas residuárias sem tratamento adequado leva a concentrações de fósforo muito superiores aos limites estabelecidos, causando eutrofização crônica e necessidade constante de dragagens e desassoreamento (Esteves, 2011).

A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece os critérios de classificação dos corpos de água e define os limites máximos de fósforo total, especialmente importantes para controle da eutrofização:

- Classe 1 (águas doces lênticas): até 0,025 mg/L de fósforo total;
- Classe 2 (águas doces lênticas): até 0,030 mg/L;
- Classe 3 (águas doces lênticas): até 0,050 mg/L (BRASIL, 2005).

Contudo, a maioria dos efluentes tratados no Brasil apresenta concentrações de fósforo superiores a 1 mg/L, o que compromete a qualidade da água e excede os limites legais (Tucci, 2009). Isso reforça a necessidade urgente de tecnologias de tratamento capazes de remover fósforo de maneira eficaz, sustentável e economicamente viável.

O controle da eutrofização depende diretamente da redução do fósforo nas fontes, principalmente nos efluentes lançados nos corpos hídricos. Nesse contexto, diversas tecnologias têm sido aplicadas para a remoção desse nutriente, destacando-se: precipitação química, com

sais metálicos (Fe, Al, Ca), processos de membranas, como nanofiltração e osmose reversa, remoção biológica aumentada, por microrganismos acumuladores de fósforo e adsorção, utilizando materiais naturais ou modificados.

A escolha das tecnologias para remoção de fósforo de efluentes deve levar em conta o contexto local, a escala operacional, a carga de fósforo e os recursos disponíveis. Dentre as alternativas, como precipitação química, osmose reversa ou remoção biológica, a adsorção tem se destacado por oferecer um equilíbrio eficiente entre eficácia técnica, baixo custo, simplicidade operacional, baixo custo de infraestrutura, produção reduzida de resíduos e viabilidade de regeneração do adsorvente (Oliveira *et al.*, 2014).

3.5 Uso da adsorção para remoção de fósforo

A remoção de fósforo de águas residuárias é uma etapa crítica nos processos de tratamento, sobretudo diante do risco de eutrofização de corpos hídricos. Entre as diversas técnicas empregadas, como a precipitação química e os sistemas por membranas, a adsorção tem se destacado como uma alternativa promissora, especialmente pela sua eficiência, simplicidade operacional e viabilidade econômica (Mezenner *et al.*, 2020).

A adsorção é um processo físico químico onde íons dissolvidos, como o fosfato (PO_4^{3-}), aderem à superfície de sólidos porosos (adsorventes). Essa técnica, aplicável em modo contínuo ou por batelada, é amplamente utilizada na remoção de poluentes inorgânicos e orgânicos. A sua eficiência depende de fatores como o material adsorvente, tempo de contato, pH, temperatura e concentração inicial do contaminante (Usman *et al.*, 2022).

As vantagens da adsorção se dão por:

- Operação simples, sem necessidade de infraestrutura sofisticada;
- Custo reduzido, especialmente com uso de materiais alternativos como biochar, zeólitas, lateritas e hidróxidos metálicos (Usman *et al.*, 2022);
- Possibilidade de regeneração e reutilização, aumentando a sustentabilidade do processo;
- Alta seletividade, permitindo remoção preferencial de íons como o fosfato, dependendo do adsorvente escolhido (Kumar, 2018).

Algumas estações de tratamento de águas residuárias (ETARs) já utilizam leitos de adsorção como etapa terciária para remoção de fósforo. Em países como Alemanha e Holanda, por exemplo, leitos com óxidos de ferro modificados são utilizados para atingir concentrações de fósforo abaixo de 0,1 mg/L, atendendo às normas ambientais mais rigorosas (Wang *et al.*, 2023).

Contudo, é importante mencionar que a adsorção também apresenta limitações. Entre elas, destaca-se a saturação rápida do adsorvente, que compromete a eficiência do processo ao longo do tempo, exigindo substituições ou regenerações periódicas. Alguns materiais apresentam dificuldade de regeneração, o que pode elevar os custos operacionais. A escolha do adsorvente ideal, portanto, deve considerar não apenas a eficiência na remoção, mas também sua capacidade de regeneração e o impacto ambiental do seu descarte após o uso (Kumar, 2018). Em suma, a adsorção se mostra eficaz e viável para remoção de fósforo em sistemas híbridos de tratamento, especialmente quando se considera fatores como pH, temperatura, concentração de fósforo e presença de outros íons concorrentes. A escolha do adsorvente ideal deve equilibrar eficiência, ciclo de vida útil, capacidade de regeneração e impacto ambiental, garantindo um processo sustentável e adequado ao contexto local (Kumari *et al.*, 2025).

3.6 Fatores que influenciam a adsorção de fósforo

A adsorção é uma técnica altamente sensível a fatores ambientais e operacionais, os quais influenciam diretamente sua eficiência na remoção de fósforo em águas residuárias. A compreensão desses fatores é essencial para otimizar a aplicação em contextos reais, especialmente diante das exigências por soluções mais eficientes e sustentáveis no tratamento de efluentes.

Entre os parâmetros críticos, destaca-se o pH da solução, que afeta tanto o grau de ionização do fósforo quanto a carga superficial dos materiais adsorventes. Segundo Sperling (2014), “o pH exerce grande influência sobre os processos de adsorção devido às mudanças nas cargas das superfícies sólidas e nas formas químicas dos solutos em solução”. Em geral, a adsorção de fósforo é favorecida em pH ácido a neutro (4–7), onde espécies como H_2PO_4^- apresentam maior afinidade com superfícies protonadas. Em pH alcalino, o processo é dificultado devido à repulsão eletrostática entre o ânion fosfato e as superfícies carregadas negativamente (von Sperling, 2014).

A temperatura é outro fator importante. Ela influencia tanto a velocidade das reações quanto a difusão dos íons nos poros do adsorvente. De acordo com Mezenner e Bensedrira (2020), o aumento da temperatura pode intensificar a mobilidade das moléculas, favorecendo a adsorção. No entanto, temperaturas elevadas também podem comprometer a estabilidade de certos grupos funcionais em materiais naturais. A análise termodinâmica, portanto, deve ser considerada para avaliar se o processo é endotérmico ou exotérmico.

O tempo de contato define o período necessário para que o equilíbrio entre adsorvato e

adsorvente seja atingido. Sperling (2014) observa que “a cinética da adsorção é geralmente caracterizada por uma fase inicial rápida, seguida por uma etapa mais lenta, controlada por fenômenos de difusão no interior das partículas”. Essa característica reforça a importância de se determinar o tempo ótimo de operação para garantir máxima remoção de fósforo sem desperdício de energia ou material.

A concentração inicial de fósforo interfere diretamente na eficiência e capacidade total do adsorvente. Em concentrações elevadas, ocorre uma saturação rápida dos sítios ativos, enquanto concentrações muito baixas podem comprometer a viabilidade econômica do processo em larga escala. Estudos recentes mostraram que, com altas concentrações iniciais ($> 50 \text{ mg/L}$), a capacidade absoluta de adsorção (q_{max}) é significativamente maior, ainda que a taxa relativa de remoção por grama de adsorvente possa ser menor (Zhang, et al, 2022).

Outro desafio importante é a competição iônica. Íons como nitrato, cloreto e sulfato presentes nas águas residuárias concorrem com o fosfato pelos mesmos sítios de adsorção. Experimentos com adsorventes derivados de bagaço de milho demonstraram que a presença de sulfato reduziu a capacidade de adsorção de fósforo em até 20%, enquanto o nitrato teve efeito ainda maior em concentrações conectadas à matriz (Wang *et al.*, 2018). A análise multicomponente confirma que minerais com afinidade por ânions de maior carga (como sulfato e fosfato) podem dominar os sítios ativos frente a nitrato e cloreto (Villabona-Ortiz *et al.*, 2022). von Sperling (2014) complementa que “a complexidade da matriz do esgoto doméstico ou industrial deve ser considerada, pois interfere diretamente na seletividade dos processos físico-químicos”.

Além dos parâmetros externos, as propriedades dos materiais adsorventes influenciam fortemente o desempenho. Destacam-se:

- Área de superfície específica: materiais com maior área apresentam mais sítios disponíveis para fosfato;
- Porosidade e estrutura de poros: microporos podem limitar a acessibilidade dos íons;
- Grupos funcionais superficiais: presença de hidroxilas, carboxilas e íons metálicos (Fe^{3+} , Al^{3+} ou La^{3+}) favorecem a formação de ligações químicas com fosfato, como observado em adsorventes modificados com óxidos metálicos (Usman *et al.*, 2022).

Nesse sentido, von Sperling (2014) destaca que “a seleção do adsorvente deve levar em conta não apenas sua capacidade de remoção, mas também aspectos como disponibilidade, custo, facilidade de regeneração e impacto ambiental”. Assim, a escolha ideal do material deve considerar a compatibilidade entre suas propriedades e os fatores ambientais do sistema.

von Sperling (2014) destaca que “a caracterização minuciosa dos materiais adsorventes é imprescindível para entender seu comportamento frente às variações do meio e para prever sua performance em escala real”. Assim, a aplicação eficiente da adsorção no tratamento de efluentes depende diretamente do conhecimento profundo sobre as propriedades dos materiais utilizados, pois são essas características que determinam tanto a afinidade com o fósforo quanto a resistência a fatores ambientais e operacionais adversos.

No entanto, é importante salientar que a caracterização por si só não garante desempenho superior. A eficácia prática de um material precisa ser validada por testes experimentais, que avaliem sua capacidade de adsorção (miligrama (mg) de P removido por grama de adsorvente), sua estabilidade ao longo de múltiplos ciclos, seu comportamento em águas reais (com presença de íons competidores e matéria orgânica) e sua viabilidade de aplicação em diferentes escalas.

3.7 Materiais adsorventes convencionais e alternativos

3.7.1. Materiais convencionais

Entre os materiais convencionais mais utilizados destacam-se o carvão ativado granular (GAC), o carvão ativado em pó (PAC) e o antracito. O carvão ativado, amplamente empregado no tratamento de águas para remoção de compostos orgânicos, também possui alguma eficácia na retenção de fósforo, especialmente quando modificado ou impregnado com metais. Como ressaltava Sperling (2014), “o carvão ativado é um dos adsorventes mais utilizados no mundo, com elevada área superficial e boa capacidade de regeneração”. Contudo, sua baixa afinidade natural com o fosfato limita sua aplicação direta, exigindo tratamentos prévios ou complementares.

O antracito, um carvão mineral de alta pureza e resistência mecânica, é amplamente utilizado como meio filtrante em sistemas de tratamento de água pelo seu suporte estrutural e estabilidade química. Embora não seja o adsorvente mais eficiente isoladamente, pesquisas demonstram seu potencial em remover fósforo, especialmente quando combinado com outros materiais ou modificado quimicamente, em leitos híbridos (Wu *et al.*, 2011).

Por exemplo, Jiang *et al.* (2009) compararam a capacidade adsorvente de alumina ativada, areia de sílica e antracito, observando que este último apresentou capacidade de até aproximadamente 100 µg/g ($\approx 0,1$ mg/g), o que, embora seja inferior à alumina ativada (3,333 µg/g), ainda indica potencial de uso em estruturas de leito filtrante.

Em construções mais modernas, Jiang *et al.* (2014) estudaram leitos filtrantes híbridos

com antracito em wetlands construídas. Eles constataram que o antracito apresentou maior eficiência na adsorção de fósforo reativo solúvel (SRP) cerca de 85,9 mg de fósforo por kg de material, superando cerâmicas biológicas, ardósia e areia de quartzo (Jiang *et al.*, 2014).

3.7.2. Materiais alternativos

Os materiais adsorventes alternativos vêm ganhando destaque nas últimas décadas, principalmente pela sua viabilidade econômica, disponibilidade regional e menor impacto ambiental. Esses materiais incluem resíduos orgânicos, subprodutos industriais e materiais naturais modificados, os quais podem apresentar boa capacidade de adsorção de fósforo com menor custo.

O biochar, obtido por pirólise de resíduos vegetais, é amplamente estudado pela alta porosidade, área superficial e potencial de funcionalização com metais (Ca, Fe, Al). Revisões recentes apontam que biochars modificados com íons metálicos apresentam excelente estabilidade e alta capacidade de adsorção de fosfato, com baixo risco de lixiviação metálica, mesmo após múltiplos ciclos de uso (Kumari *et al.*, 2024).

Além disso, o biochar enriquecido com casca de ovo (ESBC) apresenta desempenho excepcional, com capacidade de adsorção superior a 557 mg de fósforo (P)/ grama (g) e remoção de ~460 mg/g em condições de fluxo contínuo, além de atuar como fertilizante de liberação lenta (França *et al.*, 2022). Adicionalmente, cascas de ovo calcinadas mostraram taxas de remoção de fósforo acima de 97% em águas de aquicultura, confirmando seu potencial como adsorvente de baixo custo (França *et al.*, 2023). O biochar oriundo da casca de ovo tem ganhado destaque na remoção de fósforo de águas residuárias devido ao seu elevado teor de cálcio, característica que favorece fortemente a captura de fosfatos por mecanismos de precipitação e complexação superficial (Li *et al.*, 2023). Além disso, a matriz carbonácea do biochar fornece sítios adicionais de adsorção e melhora a dispersão das espécies de cálcio, resultando em materiais com capacidade de remoção muito superior à de biochars não modificados. Essa combinação de mineralidade rica em Ca e estrutura carbonosa confere ao biochar de casca de ovo um desempenho robusto em ampla faixa de pH, característica essencial para aplicações em efluentes reais (Cao *et al.*, 2020).

As argilas modificadas e os LDHs figuram entre os adsorventes mais eficazes, com capacidades de adsorção frequentemente superiores a 100 mg P/g. Combiná-los com biochar potencializa não apenas a eficiência, mas também facilita a recuperação e aplicação do fósforo obtido como fertilizante (Keyikoglu *et al.*, 2022).

Como observa von Sperling (2014), “a adoção de materiais adsorventes alternativos pode promover ganhos econômicos e ambientais significativos, especialmente quando integrados a estratégias de reuso e valorização de resíduos”.

Embora a escolha do adsorvente seja um passo essencial, o sucesso da remoção de fósforo também depende dos mecanismos de adsorção envolvidos e dos critérios operacionais adotados. Esses mecanismos, que incluem trocas iônicas, complexação de superfície, ligações eletrostáticas e precipitação estão diretamente relacionados às características dos materiais e às condições ambientais. Compreender profundamente essas interações permite não apenas selecionar o melhor adsorvente, mas também otimizar a operação dos sistemas de tratamento.

3.8 Mecanismos e critérios de adsorção na remoção de fósforo

3.8.1. Mecanismos de adsorção de fósforo

3.8.1.1 Troca iônica

A troca iônica constitui um mecanismo central na adsorção de fosfato, ocorrendo quando os ânions fosfatados substituem outros íons (como Cl^- , SO_4^{2-} ou HCO_3^-) na superfície de adsorventes com cargas positivas. Este tipo de interação é típico em adsorventes baseados em óxidos/hidróxidos de ferro (Fe), alumínio (Al) ou cálcio (Ca), que formam complexos superficiais com alta afinidade por fósforo devido à sua polarização e estrutura química (Nadagouda *et al.*, 2024).

A dinâmica de troca iônica é fortemente influenciada pelo pH da solução, força iônica, seletividade dos sítios ativos e a estrutura cristalina do adsorvente. Materiais à base de ferro zero- valente (Fe^0) geram superfícies carregadas positivamente em solução aquosa e mostram-se eficazes na remoção de fósforo por meio de combinação de troca iônica, precipitação e adsorção específica (Konadu-Amoah *et al.*, 2022). Em particular, a cooperação entre Fe^{2+} e hidróxido férrico hidratado (HFO) resultou em remoções de fósforo extremamente eficientes (até $\sim 51,7$ mg/g), evidenciando claramente a contribuição da troca iônica para esse desempenho (Wang *et al.*, 2024).

Conforme destacado por Wang *et al.* (2023), a eficiência da troca iônica está associada à presença de sítios acessíveis de coordenação metálica que promovem a liberação de ânions residuárias (como OH^- ou Cl^-) em favor da incorporação de ânions alvo, como fosfato. Em sistemas reativos contendo ferro ou cálcio, esse mecanismo pode atuar de forma sinérgica com

outras rotas, como complexação ou precipitação superficial, ampliando a capacidade total de retenção do adsorvente (Jiang *et al.*, 2014). Assim, a troca iônica representa uma via eficiente, seletiva e rápida para a adsorção de poluentes aniônicos, sendo uma das estratégias centrais na concepção de materiais avançados para remoção de nutrientes em efluentes.

3.8.1.2 Precipitação superficial

A precipitação superficial é um mecanismo relevante nos processos de adsorção, especialmente em sistemas destinados à remoção de contaminantes, como o fósforo, em tratamentos ambientais e de efluentes. Este fenômeno ocorre quando há formação de compostos insolúveis diretamente sobre a superfície do adsorvente, resultando em uma camada sólida que se adere ao material adsorvente, contribuindo para a remoção do poluente da fase líquida (Wang *et al.*, 2018).

No contexto da adsorção, a precipitação superficial pode ser confundida com a adsorção propriamente dita. No entanto, ela difere por envolver reações químicas entre o adsorvato e o adsorvente que resultam em novos compostos sólidos, geralmente sais ou hidróxidos. Em materiais contendo íons metálicos, como Fe, Al ou Ca, é comum que ocorra a formação de fosfatos metálicos pouco solúveis na superfície, levando à fixação do fósforo (Zhang *et al.*, 2022).

Esse mecanismo é particularmente eficaz em ambientes com pH favorável à formação de precipitados, o que reforça a necessidade de considerar as condições físico-químicas do meio como parte dos critérios de avaliação da adsorção. Segundo Zhang *et al.* (2018), a eficiência da precipitação superficial está diretamente relacionada ao pH, à concentração do íon metálico disponível e à presença de grupos funcionais na superfície do adsorvente.

Do ponto de vista da avaliação, um dos principais desafios é diferenciar a remoção por precipitação da adsorção propriamente dita. Técnicas como espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), aliadas à espectroscopia de energia dispersiva (EDS), têm sido amplamente utilizadas para caracterizar a superfície dos adsorventes e identificar os compostos precipitados (Chen *et al.*, 2011).

3.8.1.3 Complexação química

A retenção de íons fosfato em adsorventes modificados ocorre preferencialmente por

meio da formação de ligações covalentes ou coordenadas entre os íons fosfato e grupos funcionais da superfície dos materiais adsorventes. Essa interação se evidencia como altamente seletiva e estável, sendo particularmente eficaz em adsorventes à base de óxidos metálicos ou hidróxidos duplos em camadas (LDHs), além de argilas tratadas (Chen *et al.*, 2011).

Estudos mostram que, em LDHs como Mg-Al, Mg-Fe ou Ca-La, o fósforo adsorvido é retido principalmente por complexação de esfera interna (ligand exchange), um mecanismo que substitui grupos OH da superfície por fosfatos, resultando em ligações químicas fortes e irreversíveis, bem mais eficientes do que a simples troca iônica (Zhang *et al.*, 2022).

Além disso, em argilas modificadas com óxidos metálicos (como La, Zr ou Fe), diversos mecanismos operam sinergicamente, incluindo troca iônica, ligações de hidrogênio, precipitação de fosfatos metálicos e interações de Lewis acid-base, todos contribuindo para a remoção seletiva do fósforo (Chen *et al.*, 2011).

3.8.1.4 Atração eletrostática

A atração eletrostática na adsorção de fósforo ocorre quando o adsorvente possui carga positiva em pH abaixo do ponto de carga zero, favorecendo a interação com íons fosfato negativos (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}). Esse mecanismo é dominante em meio ácido, onde as interações eletrostáticas promovem a retenção do fosfato na superfície do material (Antelo *et al.*, 2005; Almasri *et al.*, 2019). A mesma é frequentemente apontada como o mecanismo inicial que governa a captura de espécies fosfatadas aniônicas em superfícies sólidas: quando sítios superficiais se encontram protonados eles atraem H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} por forças coulombianas, favorecendo uma adsorção rápida na fase inicial do processo (Langmuir, 1918.). Esses conceitos básicos de carga de superfície e potencial zeta explicam por que muitos estudos relatam uma fase de rápido decaimento na concentração aquosa de fosfato logo nos primeiros minutos de contato (Mohammadi-Jam *et al.*, 2024).

O pH do meio aparece como variável crítica porque determina tanto a forma iônica do fósforo ($\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$) quanto o estado de protonação dos grupos superficiais do adsorvente (Qing *et al.*, 2024). A atração eletrostática têm mostrado que a sua eficiência aumenta junto com a elevação do pH, onde a superfície permanece positivamente carregada e o fosfato é aniônico (Li *et al.*, 2023). Além disso, revisões e artigos experimentais indicam que a faixa ótima de pH varia com o material, por exemplo, adsorventes à base de metais de terras raras ou hidróxidos metálicos mantêm sítios positivos em faixas de pH diferentes das de

diversos materiais, o que altera fortemente o papel relativo da atração eletrostática (Qing *et al.*, 2024).

Em termos de materiais, a atração eletrostática costuma atuar em conjunto com mecanismos de ligação mais fortes: estudos com biochar e materiais carregados com La/Fe mostram que a captação inicial por atração eletrostática pode ser seguida de complexação química ou troca iônica com espécies metálicas no material (Jia *et al.*, 2020). Revisões recentes sobre adsorventes modificados, como alginatos, LDHs, óxidos de ferro e biochars enriquecidos, destacam que muitos projetos de modificação têm justamente o objetivo de introduzir sítios positivos para maximizar a atração eletrostática e, ao mesmo tempo, oferecer sítios para ligação específica do fósforo (Nadagouda *et al.*, 2024).

Finalmente, do ponto de vista cinético e de aplicação prática, vários trabalhos documentam um comportamento bifásico: uma etapa rápida controlada por atração eletrostática e transporte superficial, seguida por etapas mais lentas de reorganização superficial ou complexação/precipitação (Xia *et al.*, 2023). (Zhang *et al.*, 2021). Estudos também ressaltam que íons concorrentes (carboxilatos, sulfatos, carbonatos) e a força iônica da solução podem atenuar a atração eletrostática, reduzindo a capacidade efetiva de remoção em matrizes reais, motivo pelo qual muitos autores recomendam testes em água real além dos ensaios em solução sintética (Zhang *et al.*, 2021).

3.8.2. Capacidade máxima de adsorção

A capacidade máxima de adsorção é entendida como a maior quantidade de contaminante que pode ser retida por unidade de massa de adsorvente, geralmente obtida via ajuste de isotermas (Langmuir, Freundlich). Silva (2016) analisou carvões ativados granulares (CAG) empregados no tratamento de efluente de refinaria, reportando capacidade de remoção de cerca de 15 mg /g para o carvão betuminoso “Filtrador 400” em ensaios de coluna lenta. Isotermas obtidas mostraram bom ajuste, indicando que o material chegou próximo à sua saturação, importante para dimensionamento de sistemas.

A taxa de remoção expressa o quão rapidamente o adsorvente retira o soluto, crucial para aplicação prática em colunas de escoamento e regimes contínuos. Silva (2016) utilizou testes de “coluna rápida” para estimar a cinética do processo, registrando as curvas de ruptura (breakthrough) e a velocidade com que a eficiência decaiu. Já Valença (2023) demonstra a importância da modelagem dinâmico-cinética no predito do comportamento do sistema. Aplicar esse tipo de abordagem em sistemas aquosos poderia melhorar a avaliação da taxa de

remoção.

A regeneração avalia se o adsorvente pode ser reutilizado após a saturação, um ponto crítico para viabilidade econômica e sustentabilidade. Silva (2016) menciona ter comparado desempenhos antes e depois da regeneração com hidróxido de sódio (NaOH), embora sem muitos detalhes. No estudo de Valença (2023) envolvendo zeólitas para gás carbônico (CO₂), recorre-se à regeneração por variação de temperatura ou pressão, demonstrando relevância de regeneração para adsorventes porosos comuns. A regeneração eficaz geralmente depende da reversibilidade do processo (mais fácil em fisisorção), e parâmetros como estabilidade do ciclo, queda de eficiência e condições do regenerante (ex.: alteração de pH, soluções químicas ou vapor) são usados para medir esse critério (Valença, 2023).

3.8.3. Modelagem da adsorção

A modelagem matemática da adsorção é essencial para compreender o comportamento dos adsorventes e otimizar sistemas de remoção de contaminantes. As isotermas de Langmuir e Freundlich são amplamente aplicadas na modelagem da adsorção, pois permitem compreender as interações entre o adsorvente e o contaminante, bem como estimar a capacidade e o tipo de superfície envolvida no processo (Chung *et al.*, 2015).

Conforme descrito por Chung *et al.* (2015), para descrever a quantidade adsorvida do soluto em função da sua concentração, são utilizados os modelos de Langmuir (Equação 1) e Freundlich (Equação 2).

$$S = \frac{q_{\max} K_L C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}} \quad (1)$$

em que:

S = quantidade do soluto adsorvido pelo adsorvente no equilíbrio (mg g⁻¹);

q_{máx} = capacidade máxima de adsorção (mg g⁻¹);

C_{eq} = concentração do adsorbato no equilíbrio (mg L⁻¹);

K_L = constante de Langmuir (L g⁻¹).

$$S = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

em que:

S = quantidade da espécie adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1});

C_e = concentração no equilíbrio (mg L^{-1});

K_F = constante de capacidade de adsorção de Freundlich ($\text{mg}^{1-(1/n)} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$);

n = constante relacionada à heterogeneidade da superfície.

Os modelos cinéticos são fundamentais para compreender a velocidade e os mecanismos que controlam a adsorção de fósforo em águas residuárias, permitindo identificar etapas como difusão e interações químicas, além de prever o tempo necessário para atingir o equilíbrio (Edet *et al.*, 2020). Ao aplicar modelos como o de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, torna-se possível otimizar as condições operacionais e projetar sistemas mais eficientes para a remoção de fósforo em efluentes (Bouamra et al, 2018). A modelagem cinética é de suma importância em prol do comportamento do sistema, onde melhora a avaliação das taxas de remoção (Valença, 2023).

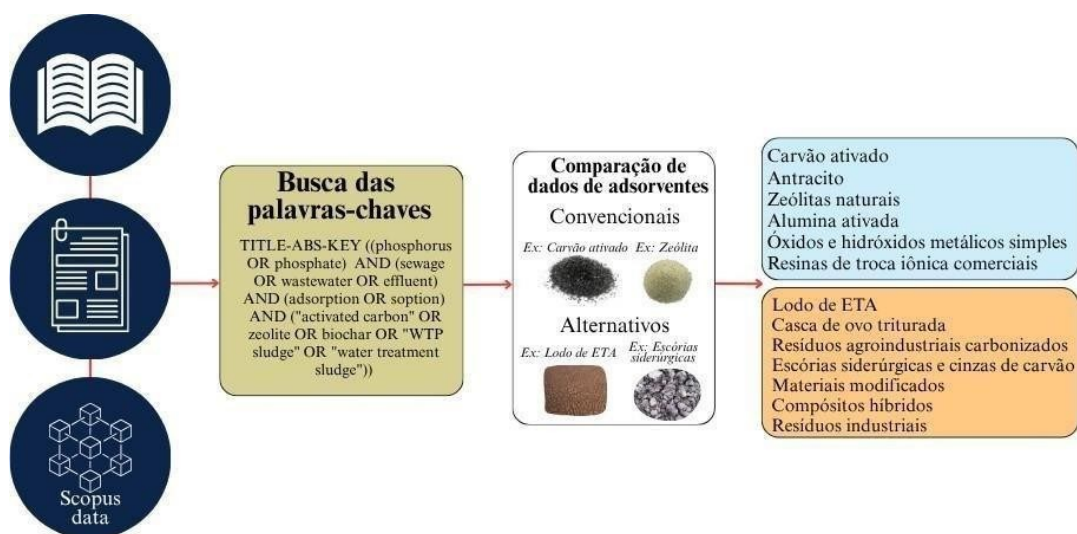
4 METODOLOGIA

4.1 Tipo e escopo do estudo

O presente trabalho caracteriza-se como uma Revisão Bibliográfica Sistemática da Literatura, de natureza descritiva e exploratória, cujo objetivo é compilar, sistematizar e analisar criticamente o conhecimento científico sobre a remoção de fósforo de efluentes sanitários, agroindustriais e industriais.

O escopo abrange as tecnologias de adsorção/sorção, destacando tanto os adsorventes convencionais, como carvão ativado de origem mineral (antracito), alumina e zeólitas, quanto os adsorventes considerados alternativos ou inovadores, tais como lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA), resíduos orgânicos, biocarvões (biochars) de diferentes origens e compósitos híbridos. A descrição estrutural da pesquisa pode ser resumida na Figura 1 abaixo.

Figura 1 - Fluxograma das estratégias de pesquisa bibliográfica na base de dados Scopus



Fonte: Adaptado do Canva (2025)

4.2 Estratégia e critério de pesquisa

A busca bibliográfica foi realizada em bases de dados científicas reconhecidas, priorizando artigos publicados em periódicos indexados disponíveis no repositório Scopus.

A estratégia de busca foi realizada em bases de dados científicas reconhecidos, com o propósito de restringir o universo de publicações a artigos de periódicos indexados. Para garantir um arcabouço de pesquisa atualizado, a busca pode ser delimitada a um período temporal específico, como de 2016 a 2024. A maior parte da busca foi realizada entre 2019 a 2024. A pesquisa será realizada mediante a combinação de palavras-chave, do qual contemplou artigos brasileiros e internacionais, em língua inglesa, relacionadas quanto ao contaminante (phosphorus, phosphate), ao meio (sewage, wastewater, efluente, “aqueous solutions”) e às tecnologias (adsorption, biochar, “WTP sludge”, zeolite, chitosan, “cement-biochar composite”, “hybrid adsorbents”, “alternative technology”), utilizando operadores booleanos (AND, OR).

4.3 Seleção das informações

A seleção dos artigos nesta pesquisa foi conduzida com base em critérios de inclusão e exclusão previamente definidos, priorizando estudos nos quais as palavras-chave estavam presentes nos títulos, resumos e selecionados de palavras-chave. Foram considerados elegíveis apenas os estudos que abordassem diretamente a adsorção de fósforo em esgoto sanitário, efluentes agroindustriais e industriais, ou soluções sintéticas utilizadas para simular efluentes, exigindo a apresentação de resultados quantitativos, como capacidade máxima de adsorção, eficiência de remoção, bem como ajustes a isotermas e modelos cinéticos. Além disso, foram incluídas publicações que discutiam aspectos como o potencial de regeneração dos adsorventes e a aplicação do fósforo recuperado, por exemplo, como fertilizante.

Foram excluídos os estudos duplicados, sem dados quantitativos e que analisaram primariamente na remoção de outros contaminantes (como corantes ou antibióticos, exceto se também abordarem P de forma significativa), ou que tratem da dinâmica do fósforo exclusivamente em contextos que não envolvam o tratamento ou reuso de efluentes.

O processo de seleção foi realizado em etapas. Inicialmente, procedeu-se à leitura de títulos, resumos e palavras-chave, de modo a identificar a aderência à temática. Em seguida, os trabalhos potencialmente relevantes foram lidos na íntegra, possibilitando a inclusão definitiva no banco de dados da pesquisa.

4.4 Sintetização e análise dos dados

Para organizar as informações, foi elaborada uma tabela comparativa contendo as seguintes variáveis: autor e ano, tipo de efluente estudado, adsorvente utilizado (convencional ou alternativo), condições operacionais (pH, tempo de contato, ponto de carga zero, concentração inicial, dose de adsorvente), capacidade máxima de adsorção (mg/g), eficiência de remoção (%), modelos isotérmicos e cinéticos aplicados.

O material selecionado foi submetido a uma leitura aprofundada para a extração de dados sobre as tecnologias avaliadas (convencionais, adsorventes), a eficiência de remoção, as condições operacionais (pH, concentração inicial) e os principais mecanismos de sorção propostos (troca iônica, atração eletrostática, precipitação). Essa etapa de análise visa categorizar os estudos e realizar uma síntese crítica e comparativa. A comparação se concentrará no desempenho das tecnologias, nas vantagens (como o baixo custo e a simplicidade operacional da adsorção) e nas desvantagens (como a produção de lodo e os custos operacionais da precipitação química ou as dificuldades operacionais dos processos biológicos).

A coleta e análise dos dados contemplaram tanto a eficiência de adsorção, como também as estratégias de modificação e otimização dos materiais, como impregnação com metais (Fe, Mg, La, Ca), ativação térmica ou química, e processos de ativação física (micro-ondas, plasma, corona). Também são considerados os aspectos relacionados ao ponto de carga zero (pH_{PZC}), à área superficial (BET) e à morfologia superficial (MEV, FTIR, DRX), uma vez que são parâmetros determinantes no desempenho dos adsorventes.

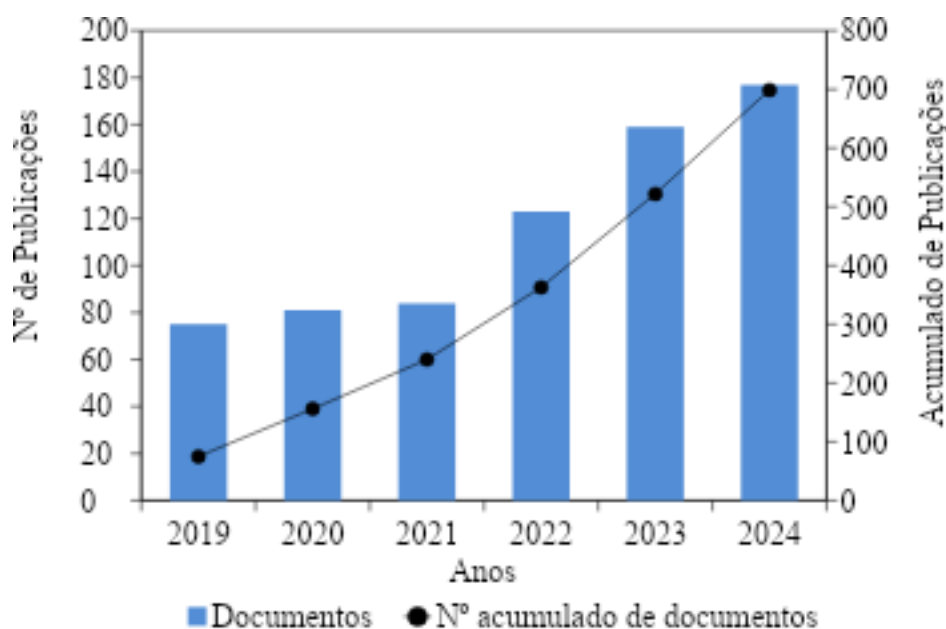
A presente revisão busca analisar, criticamente, os aspectos de soluções práticas, sustentáveis e de escalabilidade das tecnologias de adsorção utilizadas para remoção de fósforos presente em águas residuárias. Assim, o estudo oferece uma visão abrangente das capacidades de adsorção dos materiais específicos, ressaltando sua eficiência, potencial ambiental e aplicabilidade em sistemas reais de tratamento de águas residuárias. Além disso, busca destacar propostas tecnológicas que conciliem eficácia de remoção com baixo custo e menor impacto, contribuindo para o avanço de soluções sustentáveis e economicamente viáveis, proporcionando ampliação da discussão sobre futuras diretrizes sobre remoção e recuperação de fósforo de águas residuárias.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Tendências de publicação na temática da adsorção de fósforo

Após o processo inicial de busca e triagem, foram identificados 699 artigos relacionados ao tema de adsorção de fósforos (Figura 2).

Figura 2 - Tendência de publicações nos últimos anos sobre adsorção de fósforo de águas residuárias

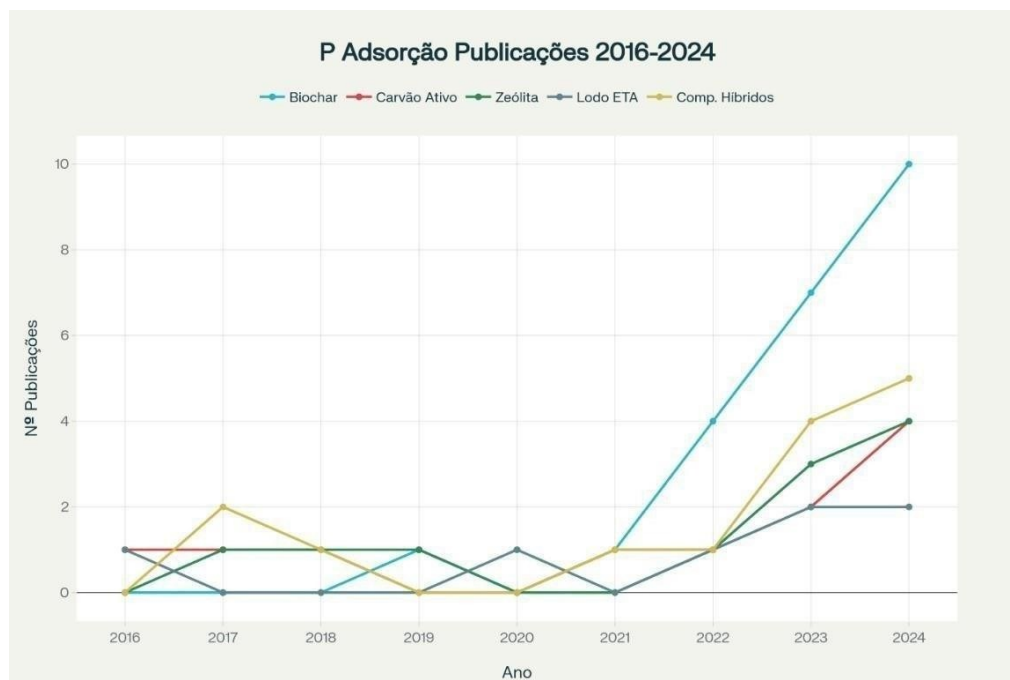


Fonte: Adaptado da SCOPUS™ Database (2025)

Desses, apenas 66 atenderam integralmente aos critérios de inclusão específicos, que estabeleceram uma conexão direta entre remoção de fósforo e o uso de adsorventes convencionais, alternativos e os classificados como híbridos, em águas residuárias. Além disso, observa-se que entre 2019 e 2021 houve um crescimento lento no número de publicações, indicando uma fase preliminar com menor interesse em pesquisas sobre a remoção de fósforo por métodos de adsorção com carvão ativado de águas residuárias, semelhante às observações de Li *et al.* (2023). Contudo, em 2024 houve 177 publicações, um aumento médio de 52% em relação a 2021. Dessa forma, indicando que há uma evidente tendência contínua no interesse em pesquisas sobre diferentes capacidades de adsorções de carvões ativados para a remoção de fósforo (Di Capua *et al.*, 2022), mais do que isso, se alinha a necessidade de redução da emissão de poluentes presentes em esgotos para os corpos hídricos e, consequentemente, a promoção da sustentabilidade.

A compreensão do número de publicações também foi analisada quanto a diversificação dos estudos com diferentes tipos de materiais adsorventes (Figura 3).

Figura 3 - Tendência de publicações nos últimos anos sobre adsorção de fósforo de águas residuárias associadas ao tipo de adsorvente

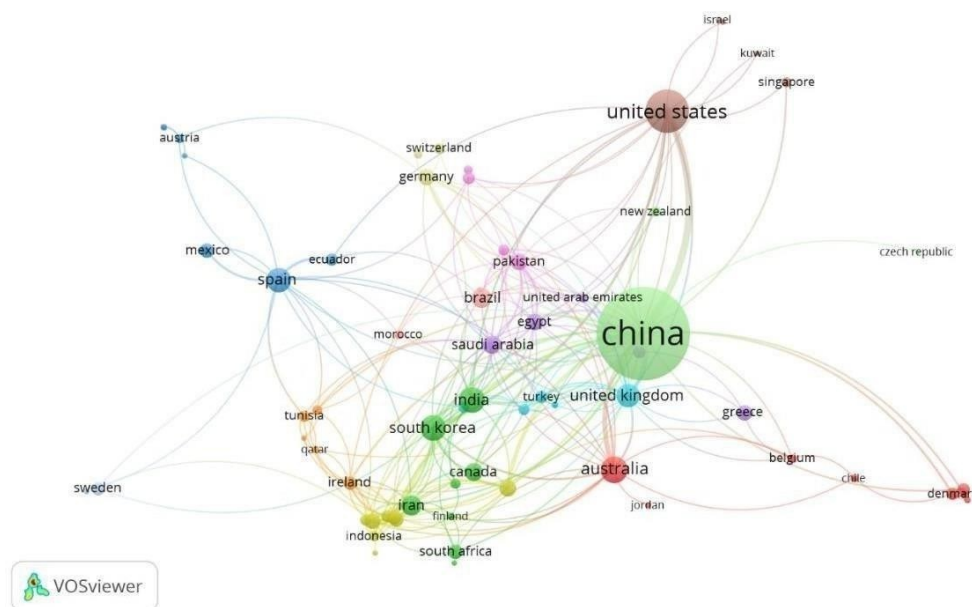


Fonte: Autoria própria (2025)

A partir de 2021 e 2022 houve um crescimento ascendente nos estudos com diferentes materiais, em especial o biochar e os compostos híbridos, sendo muito destes associados a um carvão com novos polímeros e novas estratégias de impregnação química para potencializar a adsorção de fósforo. Além disso, compostos como zeólitas e aqueles produzidos com lodo de ETAs foram utilizados em função de suas características alternativas e de menor custo, ao mesmo tempo que resultam em eficiências de remoções satisfatórias.

Conforme Figura 4, de todos os países identificados, China, Estados Unidos, Austrália e Espanha representam as maiores intensidades dos nós visualizados no mapa, constituindo os países com maiores números de publicações. Além disso, estes países desempenham elevadas pesquisas colaborativas com diversos outros países, a exemplo do Reino Unido, Índia, Coreia do Sul, Canadá e Brasil, uma vez que há diferentes intensidades de conexões em rede. Por outro lado, países que margeiam o mapa de colaborações, como Israel, México, Tunísia, Dinamarca, Marrocos, entre outros, tiveram menor número de publicações, conforme critério de pesquisa na Scopus, resultando em conexões mais fracas.

Figura 4 - Ocorrência de artigos por países publicados nos últimos 5 anos e nuvem de palavras-chaves sobre adsorção de fósforo e águas residuárias



Fonte: Adaptado do VOSviewer (2025)

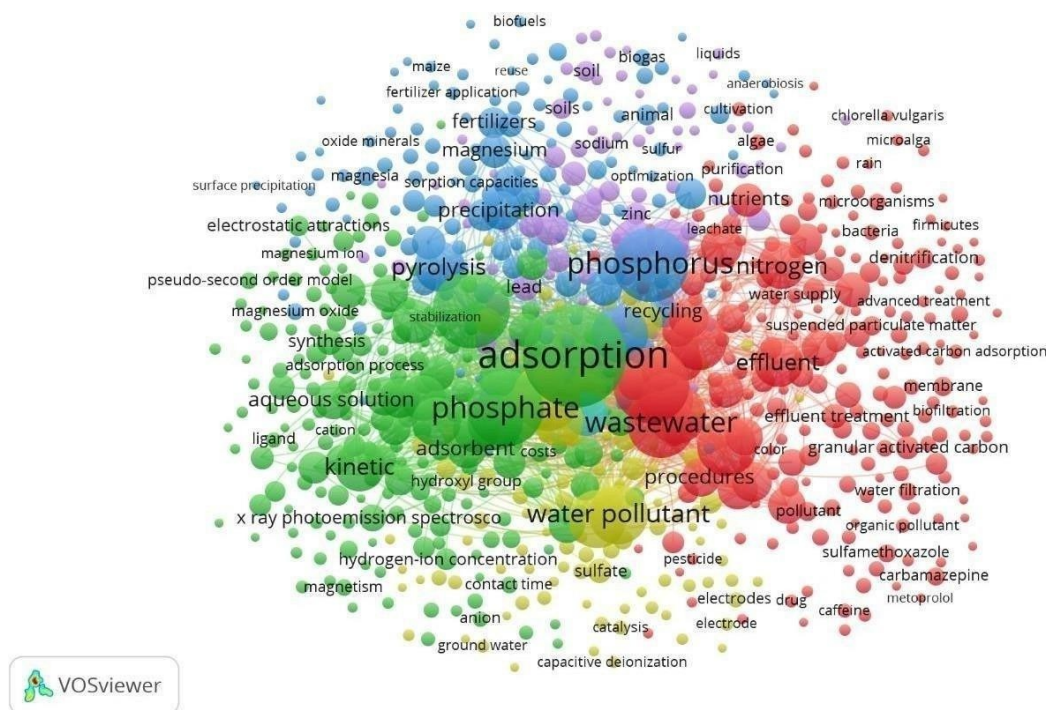
Chen *et al.* (2025) realizaram um estudo de rede de publicações de pesquisas sobre remoção de fósforo por diferentes mecanismos e constataram que a China, os Estados Unidos e o Reino Unido apresentaram nós maiores, indicando que o tamanho do nó estava correlacionado positivamente com a intensidade da colaboração internacional e a escala da produção científica. Destacando, ainda, que esses países apresentavam uma cooperação científica mais fortalecida e um engajamento de pesquisa mais forte sobre o tipo de fósforo fosfina no tratamento de águas residuárias.

Wu *et al.* (2019) destacam que os estudos com adsorventes, em especial o biochar, vem crescendo de forma considerável em diferentes países, principalmente pela versatilidade de aplicabilidade. Além disso, a aplicação em sistemas de tratamento de águas residuárias têm ganhado maior ênfase a partir de 2017, demonstrando, assim, que a remoção de fósforo de águas residuárias como estratégias para proporcionar melhorias de qualidade dos corpos hídricos, principalmente aqueles com algum grau de eutrofização, tem sido abordado de forma ampla, uma vez que ainda não se atingiu a saturação tecnológica da adsorção (Selvan *et al.*, 2025), bem como as estratégias de recuperação deste nutriente é uma necessidade do ponto de vista estratégico.

Atualmente, os estudos de adsorção de fósforo têm demonstrado como estratégia crucial

no tratamento de diferentes águas residuárias, conforme (Figura 5).

Figura 5 - Análise de rede de coocorrência de palavras-chave sobre esgoto adsorção de fósforo águas residuárias usando o software VOSviewer



Fonte: Adaptado do VOSviewer (2025)

A compreensão cientiométrica por meio das palavras-chaves representam os objetivos principais das pesquisas científicas, sendo sua análise capaz de destacar importantes avanços da temática estudada (Li *et al.*, 2020). Assim, na rede de co-ocorrência, cada nó representa uma palavra-chave que se difere em seu tamanho e cor, sendo a distância entre os nós representando as conexões entre as palavras-chaves, nesse sentido, uma menor distância está associada a uma interação mais forte entre duas palavras-chave.

Conforme Figura 5, por meio do VOSviewer, constatou-se a ocorrência de cinco clusters de palavras-chaves, diferenciado por cores e as conexões dos agrupamentos. Os termos mais frequentes foram identificados no cluster verde (“adsorption”, “phosphate” e “kinetic”), cluster vermelho (“wastewater”, “effluent”, “nitrogen”, “procedures” e “nutrient”), cluster azul (“phosphorus”, “pyrolysis”, “precipitation” e “fertilizers”), cluster roxo (“zinc”, “soils” e “sodium”) e cluster amarelo (“water pollutant”, “sulfate”).

A diversificação dos clusters está associado a ampla capacidade dos estudo sobre adsorventes, sendo bem além do processo de adsorção estritamente voltadas para o fósforo. Além disso, por meio do cluster verde percebe-se que o desempenho de adsorção de fósforo

está relacionado aos estudos de cinéticas, condição primordial para compreender a concentração ideal para potencializar o uso dos diferentes materiais adsorventes convencionais, alternativos ou hídricos.

Por meio do cluster vermelho e, principalmente, sua proximidade com o cluster verde e azul, percebe-se uma forte conexão da adsorção com os termos associados ao fósforo e as águas residuárias ou efluentes. Tal condição se justifica em consórcio com o cluster amarelo, destacado, principalmente, pelo termo “water pollutant”, visto que um dos principais problemas associados aos efluentes, a exemplo os de origem doméstica, está relacionado a maiores concentrações de fósforo em sua composição e, consequentemente, sua capacidade de alteração do padrão de qualidade dos corpos hídricos, principalmente associado ao processo da eutrofização (Wanga *et al.*, 2025). Assim, um número maior de estudos que buscam produzir um efluente de menor concentração de poluentes tem sido observado (Januševičius *et al.*, 2024; Wei *et al.*, 2024).

Tabela 1 - Tecnologias convencionais para adsorção de P

Tipo de Adsorvente	Efluente	Material de origem	Condições Operacionais(Ph; tempo; concentração; dose)	Capacidade Adsorptiva (mg/g)	Eficiência (%)	Modelos Isotérmicos/Cinéticos	Mecanismos de Adsorção	Potencial de Regeneração/Reúso	Vantagens/Limitações	Referência
Convencional	Doméstico	Carvão ativado	pH 7;1-2h; 800-1150 mg/L;0,5g/L	19,84	99,94	Freundlich, SIPS, PSO	Atração eletrostática,troca de ligantes	Alta	-	Ilham <i>et al.</i> , 2024
Convencional	Sintético	Zeólita natural	pH 4-10;24h; 0-10 mg/L;1g/L	LZ=122,7;LMZ=109,17	94,5;98,2	PSO, Langmuir	Complexação, atração eletrostática	Alta/ Passivador	-	Luo <i>et al.</i> , 2024
Convencional	Sintético	Carvão ativado	pH 4-10;24h; 5-20 mg/L;1g/L	NAC=1,60	80%	PPO, Langmuir	Precipitação superficial, complexação, troca iônica	Alta/ Alta reciclabilidade e estabilidade.	Sustentável, baixo custo, variabilidade	He <i>et al.</i> , 2024
Convencional	Doméstico	Carvão ativado	pH 3–8; 60–120 min;3–60 mg/L; 3 g/L	45°C = 0.942-2.874	-	Langmuir	Precipitação química, adsorção superficial	Alta	-	Braun <i>et al.</i> , 2019
Convencional	Sintético	Zeólita natural	pH 5-10;120-168h; 0,5-200 mg/L;10 g/L	308K=9,66;	10 mg/L: 97,6	Langmuir, Freundlich, PPO, PSO	Precipitação, troca de ligantes	Alta/ Fósforo aplicado como corretivo do solo	Tamanho	Mitrogiannis <i>et al.</i> , 2017
Convencional	Doméstico	Carvão ativado	pH 3-11;2h; 10-100 mg/L;0,7 g/L	MAAC/AEM//CEM/AC=17,91	72,6	-	Complexação, troca iônica, grupos funcionais	Alta/ Aplicações práticas no tratamento de água	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Cuong <i>et al.</i> , 2024

Fonte: Autoria própria (2025)

Legendas: LZ: zeólita natural modificada com lantânio; LMZ: zeólita magnética modificada com lantânio; NAC: material de eletrodo de carbono ativado dopado com nitrogênio; MAAC/AEM/CEM/AC: junção de um eletrodo de carvão ativado (MAAC), membrana de troca aniônica (AEM), membrana de troca catiônica (CEM) e carvão ativado (AC); pH: potencial hidrogeniônico; h: horas; min: minutos; mg/L: miligramas por litro; g/L: gramas por litro. mg/g: miligramas por grama; PPO: pseudo-primeira ordem; PSO: pseudo-segunda ordem; °C: graus celsius; K: temperatura kelvin. *Condições operacionais: pH, tempo de contato, concentração e dosagem.

Tabela 2 - Tecnologias alternativas para adsorção de P

Adsorvente	Efluente	Material de origem	Condições Operacionais	Capacidade Adsorptiva (mg/g)	Eficiência (%)	Modelos Isotérmicos/Cinéticos	Mecanismos de Adsorção	Potencial de Regeneração /Reúso	Vantagens/ Limitações	Referência
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados	pH 3–11; 30–60 min; 10–50 mg/L; 1–4 g/L	MMBC=28,65	80-96	Langmuir, Freundlich, PPO, PSO	Precipitação, troca de ligantes	Alta	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Yin <i>et al.</i> (2024)
Alternativo	Doméstico	Casca de ovo	pH 2-12; 24h; 50–200 mg/L; 0,666 g/L	Ca-PSB2=150,23	Ca-PSB2=93,2	Langmuir, PSO	Precipitação, complexação superficial	Alta/Potencial de reúso agrícola comprovado	Sustentável, baixo custo, variabilidade	(2024)
Alternativo	Sintético	Lodo de ETA	pH 6–8; 180-360 min; 10–50 mg/L; 0,5 g/L	27,69	25 mg/L = 91,02	Langmuir, PSO	Atração eletroestática, compexação	Alta	Estabilidade, estrutura porosa	Li <i>et al.</i>
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados (La2(CO3)3)	pH 4-6;12h; 10-50 mg/L; 0,25 g/L	pH 5: LMB/La(CO3)3/MnFe2O4=88,2	99	Langmuir, Freundlich, PSO	Atração eletroestática, troca de ligantes	Média	Resistência ao ambiente aquático	Ouyanget <i>al.</i> (2024)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados	pH 1,4-3;3h; 10-50 mg/L;4-50 g/L	pH 1,4: 53,1	96	Langmuir, PSO	Atração eletroestática, troca de ligantes	Alta	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Hu <i>et al.</i> (2024)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados	pH 3-11;3h; 0,5-25 mg/L;1 g/L	pH 7: MBC=52,53,	OH/NH2@MBC=92,36	-	Atração eletroestática, precipitação	Alta	Baixo custo, economia de energia, alta eficiência	Zhang <i>et al.</i> (2024)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados	pH 4-8;4h; 0,5-25 mg/L; 0,1-0,3 g/L	La-MBC=27,49	72,52-100	Langmuir,PSO	Precipitação, complexação interna	Média/Purificação de águas residuárias	Baixo custo, economia de energia, alta eficiência	Yi <i>et al.</i> (2024)
Alternativo	Doméstico	Compósitos híbridos	pH 3-7;22h; 10-200 mg/L; 0,4 g/L	LDH/PMA/BC=109,9	99-100	Langmuir, PSO	Ligaçõesde hidrogênio	Alta/Controle de poluição	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Huang <i>et al.</i> (2024)
Alternativo	Doméstico	Biochar	pH 2-12; 6h; 10-200 mg/L; 0,4 g/L	25,6	-	PSO, Langmuir	Coprecipitação	Alta/Potencial de reúso agrícola comprovado	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Hu <i>et al.</i> (2023)
Alternativo	Doméstico	Compósitos híbridos	pH 2-12; 24h; 100 mg/L;2 g/L	B-MG/ALLDH-1= 15,48	B-Zn/Al-LDH-1=92,9	Elovich	Complexação superficial, troca iônica	Alta	-	Yang <i>et al.</i> (2019)

Tabela 2 - Tecnologias alternativas para adsorção de P

Alternativo	Doméstico	Biochar	pH 2-8; 0,5-48h; 2-100 mg/L; 10 g/L	LCB300= 64,3; LHB800=65;	LCB300=73-99; LHB800=90-100;	PPO, PSO	Complexação interna, troca iônica	-	-	Huang <i>et al.</i> (2022)
Alternativo	Sintético	Materiais modificados	pH 3-10; 3h; 50-100 mg/L; 0,1 g/L	FBC600=149,27	-	PSO, Langmuir	Precipitação, complexação, troca iônica	-	-	Xu <i>et al.</i> (2023)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados(Fe/Ca), Lodo de ETA	pH 4-8; 2h; 2- 100 mg/L; 1 g/L	gBC600-4B=2,414	97,97	PPO, Langmuir	Precipitação química, atração eletroestática, ligação de hidrogênio	-	-	Wang <i>et al.</i> (2024)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados(La-Fe)	pH 2-6; 10h; 100-800 mg/L; 2 g/L	FLO@CSL=137,14	>96	PSO, Langmuir	Complexação interna, troca de ligantes	Alta/ Colunas de leito fixo	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Cui <i>et al.</i> (2023)
Alternativo	Sintético	Materiais modificados	pH 3-11; 3h; 10- 100 mg/L; 1 g/L	pH 4: BC20= 147	-	PPO, PSO, Langmuir, Freundlich	Precipitação química, complexação	Alta	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Antunes <i>et al.</i> (2018)
Alternativo	Sintético	Biochar	pH 2-9; 120-240 min; 5-1000 mg/L; 2 g/L	MB3>=111;	>60	Langmuir, Freundlich, PPO, PSO	Troca iônica, complexação, troca de ligantes	Alta	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Yang <i>et al.</i> (2018)
Alternativo	Doméstico	Borra de café	pH 2-11; 120- 240 min; 5-200 mg/L; 2 g/L	EB 2:1= 106,99	50 mg/L: >96	Langmuir, PSO	Precipitação, complexação superficial	Alta	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Yang <i>et al.</i> (2021)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados	pH 5-10; 120- 168h; 5-500 mg/L; 10 g/L	MBAC4=69,80	MBAC4: FRDW= 84,65%; TDW= 96,97	Langmuir, PPO, PSO	Precipitação química, complexação	Alta	-	Wen <i>et al.</i> (2021)
Alternativo	Doméstico	Compósitos híbridos	pH 3-7; 3-10h; 10-50 mg/L; 0,125g/L	Mg-SSBC= 54,44	-	PPO, Langmuir	Grupos funcionais	Média/alta	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Elkhilfi <i>et al.</i> (2023)
Alternativo	Sintético	Lodo de ETA	pH 2-10; 20min; 5-20 mg/L; 1g/L	BCp-N-600 = 42,3	-	PSO, Langmuir	Precipitação, complexação, troca iônica	Alta/ Ortofosfato inorgânico	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Yang <i>et al.</i> (2024)
Alternativo	Doméstico	Compósitos híbridos	pH 3-11; 12h; 1- 450 mg/L; 1,25g/L	DSBC700=51,79	-	PSO, Langmuir	Precipitação superficial, complexação	Alta/ Crescimento de plantas	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Liu <i>et al.</i> (2022)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados	pH 3-11; 12h; 200-1000 mg/L; 2g/L	nano-CaO2/BC=213,22	-	Langmuir, Freundlich	Precipitação	Média/ Crescimento de plantas	-	X, Li <i>et al.</i> (2020)
Alternativo	Doméstico	Biochar	pH 8-12; 3-6h; 1-200 mg/L; 3g/L	VBC600= 103	-	PPO, Langmuir	Troca de ligantes, complexação interna, precipitação	Alta/ Fósforo aplicado como corretivo do solo	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Zhang <i>et al.</i> (2023)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados	pH 3-9; 3h; 10- 1g/L	La-TC= 148,11	10-30 mg/L: 100	Langmuir, Elovich, PSO	Atração eletroestática, troca de ligantes, complexação	Alta/ Purificação de águas residuárias	Baixo custo, economia de energia, alta eficiência	Jia <i>et al.</i> (2020)

Tabela 2 - Tecnologias alternativas para adsorção de P

Alternativo	Doméstico	Biochar	pH 2-10;30 min; 1-500 mg/L;1-40g/L	La-SSBC=312,55	>=97,5	PSO, Langmuir	Atração eletroestática, troca de ligantes, complexação interna	Alta	Processo exclusivo de dupla camada de captura de fosfato	Elkhlifi <i>et al.</i> (2022)
Alternativo	Doméstico	Biochar	pH 3-6;24h; 25-400 mg/L;0,5-20g/L	La-600SS-OH=93,91	25 mg/L:98,89	PSO, Langmuir	Atração eletroestática, troca de ligantes, complexação interna	Alta	Pouca probabilidade de ser lixiviado	JLi <i>et al.</i> (2020)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados	pH 3-9; 30-180min; 10-30 mg/L;2 g/L	La-MB=116	98	PSO,Langmuir , PTO	Atração eletroestática, troca de ligantes, complexação interna	Baixa	-	Li <i>et al.</i> (2022)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados (MgO)	pH 5-10; 12h; 10-70 mg/L; 2 g/L	MgO-PMBC: pH 7=122,01	97,57	PPO, Langmuir	Precipitação	Alta	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Wu <i>et al.</i> (2024)
Alternativo	Doméstico	Materiais modificados	pH4-10;3-6h; 10-50 mg/L;0,5g/L	MBC/Mg–La-3= 62,50	10 mg/L: 98	Langmuir, Freundlich	Atração eletroestática, troca de ligantes, complexação interna	Alta/ Fósforo aplicado como fertilizante, crescimento de plantas	Baixo custo, economia de energia, alta eficiência	Zhu <i>et al.</i> (2023)
Alternativo	Doméstico	Borra de café	pH 2-11; 2-6h; 10-400 mg/L; 0,5 g/L	298,15 K: CMBC=144,31	-	PSO, Langmuir, Freundlich	Precipitação superficial, complexação	Alta/ Fósforo aplicado como fertilizante, crescimento de plantas	Baixo custo, economia de energia, alta eficiência	Chen <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Autoria própria (2025)

Legendas:pH: potencial hidrogeniônico; h: horas; min: minutos; mg/L: miligramas por litro; g/L: gramas por litro; mg/g: miligramas por grama; PPO: pseudo-primeira ordem; PSO: pseudo- segunda ordem; PO: pseudo-terceira ordem; MMBC: biochar magnético dopado com óxido de magnésio; Ca-PSB₂: biochar carregado de Ca tipo 2; LMB/La₂(CO₃)₂/MnFe₂O₄]; composto de biocarvão (LMB) carregado com carbonato de lantânio (La₂(CO₃)₂) e ferrita de manganês (MnFe₂O₄); LDH/PMA/BC: biochar junto a argilas modificadas e LDH; B-Zn/Al-LDH: biochar derivado de talo de milho com diversas formas de hidróxidos duplos lamelares modificados com zinco e alumínio; B-Mg/Al-LDH: biochar derivado de talo de milho com diversas formas de hidróxidos duplos lamelares modificados com magnésio e alumínio; LCB300: carbonato de lantânio/biochar; LHB800:Hidróxido de lantânio/biochar; FBC600: biochar magnético a partir de resíduos de casca de caranguejo; gBC600-4B: Biochar carregado com Fe e cálcio Ca; FLO@CSL:Biochar de lignina sulfonilmetilada modificada com lantânio-ferro bimetalico magnético; BC20: biochar com 20% de dióxido de cálcio (OH)₂; MB3: Biochar à base de lodo ativado residual (WAS) impregnado com cloreto de ferro III (FeCl₃); EB 2:1: Biochar à base de casca de ovo modificado na proporção 2:1; MBAC4: quarta amostra de um carvão ativado derivado de um biochar modificado; nano-CaO₂/BC: Nanopartículas de peróxido de cálcio (CaO₂) carregadas com biocarvão poroso (BC); VBC600: biochar de origem vegetal preparado à 600°C; La-TC: biochar de fibra de plátano modificado com lantânio; La-SSBC: biochar de lodo de esgoto projetado com hidróxido de lantânio (La-OH); La-600SS-OH: biochar de lodo de esgoto à 600 °C modificado com La-OH; La-MB: Biochar de platina modificado com La(OH)₃ magnético fraco; MgO-PMBC: biochar de esterco suíno modificado com MgO; MBC/Mg–La-3: biochar magnético modificado com magnésio e lantânio; CMBC:

biochar eficiente de borra de café co-modificado com cálcio (Ca) e magnésio (Mg).

Tabela 3 - Tecnologias alternativas e convencionais para adsorção de P

Tipo de Adsorvente	Efluente	Material de origem	Condições Operacionais (pH; tempo; concentração; dose)	Capacidade Adsorptiva (mg/g)	Eficiência (%)	Modelos Isotérmicos/Cinéticos	Mecanismos de Adsorção	Potencial de Regeneração/Reuso	Vantagens/Limitações	Referência
Híbrido	Doméstico	Materiais modificados	pH 3-11; 12h; 1-450 mg/L; 1,25g/L	Fe/N@BC=165,02	64,5	Langmuir, Freundlich, PSO	Atração eletroestática, troca de ligantes	Média/ Adsorver multipoluentes de soluções aquosas	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Li <i>et al.</i> , 2022
Híbrido	Doméstico	Materiais modificados	pH 3-7; 3-10h; 10-50 mg/L; 1g/L	BC-γ-Fe ₂ O ₃ /MgO = 19,27	82,3	PPO	Atração eletroestática, troca de ligantes	Alta/ Ortofosfato inorgânico	Sustentável, baixo custo, variabilidade	An <i>et al.</i> , 2022
Híbrido	Doméstico	Carvão ativado, Materiais modificados (La/Mg)	pH 4-8; 0-720min; 1,5-3,5 mg/L; 0,1g/L	SDAC-La/Mg=3,82	65	PSO, Langmuir	Precipitação superficial, complexação	Alta/ Fósforo aplicado como fertilizante, crescimento de plantas	Baixo custo, economia de energia, alta eficiência	Chen <i>et al.</i> , 2024
Híbrido	Doméstico	Materiais modificados	pH 2-11; 24h; 5-300 mg/L; 40 g/L	ZnBC-OH= 36,6	-	Langmuir, PSO	Precipitação	Alta	-	Li <i>et al.</i> , 2024
Híbrido	Doméstico	Materiais modificados	pH 2-12; 12h; 15-500 mg/L; 0,5-5 g/L	: Fe- MnBC=135,88	pH < 7: >95,96	Langmuir, Freundlich, PSO	Atração eletroestática, compexação interna	Alta/ Controle de poluição	Sustentável, baixo custo, variabilidade	Beiyuan <i>et al.</i> , 2024

Fonte: Autoria própria (2025)

Legendas: pH: potencial hidrogeniônico.; h: horas; min: minutos; mg/l: miligramas por litro; g/l: gramas por litro; mg/g: miligramas por grama; PPO: pseudo-primeira ordem; PSO: pseudo- segunda ordem; Fe/N@BC: biochar modificado com ferro e nitrogênio; BC-γ-Fe₂O₃/MgO: biochar modificado com óxido de ferro III e óxido de magnésio; SDAC-La/Mg: carvão ativado de esterco de ovelha modificado a lantânio e magnésio; ZnBC-OH: biochar modificado por zinco preparado por pirólise de biomassa mediada por metais com imersão alcalina; Fe-MnBC:biochar modificado com ferro e manganês.

5.2 Aplicação de adsorventes convencionais para remoção de fósforo

Os adsorventes convencionais, por mais que sejam materiais utilizados desde a década de 50, ainda são referência para vários estudos de adsorção de fósforo (Nadagouda *et al.*, 2024). Apresentando características peculiares, como elevada disponibilidade comercial, padronização industrial na produção, custos relativamente conhecidos e seu vasto histórico de aplicações (Ilham *et al.*, 2024).

Destacam-se que os materiais classificados como carvão ativado e zeólita natural seguem sendo amplamente utilizados no âmbito como mecanismo de adsorção de fósforo em águas residuárias, principalmente em função de suas propriedades físico-químicas (Malekmohammadi *et al.*, 2016). Um estudo de Ilham *et al.* (2024) identificou 99,9% de remoção de fósforo utilizando carvão ativado. Já Cuong *et al.* (2024) obtiveram números de eficácia menores, com 72,6%, apresentando uma capacidade de adsorção de 17,91 mg/g de fósforo para um adsorvente com a junção de um eletrodo de carvão ativado (MAAC), membrana de troca aniônica (AEM), membrana de troca catiônica (CEM) e carvão ativado (AC) (MAAC/AEM//CEM/AC). Ilham *et al.* (2024), através da predominância do modelo de Freundlich e da equação Pseudo- 2º ordem, obteve como máximo valor de adsorção, 19,84 mg/g. Ambos apresentaram um alto potencial de regeneração, porém, vale ressaltar que o sistema MAAC/AEM//CEM/AC, presente no estudo de Cuong *et al.* (2024) demonstrou uma capacidade de regeneração aprimorada de 98%, demonstrando um bom reuso do fósforo recuperado para águas residuárias práticas. Os autores ainda realçam a concentração de fósforo de 189,0% durante a fase de sua recuperação. Como ressalta von Sperling (2014, p. 277), “o carvão ativado é um dos adsorventes mais utilizados no mundo, com elevada área superficial e boa capacidade de regeneração”.

O carvão ativado, amplamente empregado no tratamento de águas para remoção de compostos orgânicos, também possui alguma eficácia na retenção de fósforo, especialmente quando modificado ou impregnado com metais. Através do modelo de Langmuir e em águas residuárias domésticas, Wen *et al.* (2021) obtiveram uma eficiência de remoção com MBAC4 de 84,65 e 96,97% para águas residuárias domésticas brutas filtradas (FRDW) e águas residuárias domésticas tratadas (TDW), respectivamente, apresentando uma capacidade de adsorção de 69,80 mg/g para o adsorvente quarta amostra de um carvão ativado derivado de um biochar modificado (MBAC4), apesar de apresentar tempos de contato fora dos padrões, com faixa de 120-168 horas.

Em soluções com baixa concentração de fósforo, os sítios ativos do adsorvente são

suficientes para capturar a maior parte do poluente, resultando em elevada eficiência de remoção (Zhang *et al.*, 2024). Nesse sentido, Mitrogiannis *et al.* (2017) trabalharam com zeólita natural tratando águas residuárias sintéticas, em condições operacionais com concentrações entre 0,5 e 500 mg/L, respectivamente, onde observaram-se uma taxa de remoção de fósforo de 97,6% na concentração de 10 mg/L, corroborados tanto pela difusão do filme quanto pela difusão intrapartícula analisada na remoção de fosfato. Por outro lado, para concentrações maiores, os autores observaram redução gradual da capacidade do adsorvente em remover fósforo ao longo dos ciclos de análise. Além disso, destaca-se o alto potencial de regeneração do fósforo por meio da aplicação como corretivo no solo, muito devido a seu tamanho.

Recentemente, Luo *et al.* (2024) obtiveram melhores desempenhos com faixas de pH 4 a 10, similares a de Mitrogiannis *et al.* (2017), os quais trabalharam nas faixas de 5 a 10. Entretanto, com até 10 mg/L de concentração e dosagem dez vezes menor, como podemos observar na Tabela 1. Conseguiram eficiência de 94,5 e 98,2%, e capacidade de adsorção de 122,7 e 109,17 mg/g, para zeólita natural modificada com lantânio (LZ) e zeólita magnética modificada com lantânio (LMZ), respectivamente, também em águas residuárias sintéticas. Destacando sua alta capacidade de regeneração e potencial aplicação como material corretivo do solo. Luo *et al.* (2024) reforçam que a complexação de esfera interna e a atração eletrostática atuaram como os principais mecanismos que facilitaram a adsorção de fósforo.

Embora não seja o adsorvente mais eficiente isoladamente, pesquisas demonstram que o antracito, um carvão mineral de alta pureza e resistência mecânica, tem um elevado potencial em remover fósforo, especialmente quando combinado com outros materiais ou modificado quimicamente, em leitos híbridos (Wu *et al.*, 2011). He *et al.* (2024) obtiveram uma capacidade de adsorção de apenas 1,60 mg/g, para um material de eletrodo de carbono ativado dopado com nitrogênio (NAC), no entanto, os autores realçam um alto potencial de regeneração, dado que conseguiram uma eficiência na remoção de fósforo de até 80%, após quatro ciclos, com elevada reciclabilidade e estabilidade, reforçando a forte característica de regeneração de fósforo, através do carvão ativado.

As características de pH dos materiais adsorptivos apresentam capacidade de manutenção ou mudanças dos valores de pH em amostras ricas em fósforo, uma vez que influenciam o pH da solução rica em fósforo e, portanto, podendo alterar as capacidades de adsorções (Muisa *et al.*, 2020). Dessa forma, os materiais que apresentam elevado pH alcalino tende elevar o pH da solução de P, enquanto os materiais com baixo pH podem diminuir o pH da solução (Li *et al.*, 2016). Um estudo de Li *et al.* (2024), trabalhando com adsorventes convencionais e alternativos, como Ca, Al, Mg e zinco, tiveram como mecanismo de adsorção predominante, a

precipitação superficial, obtendo valores de capacidade máxima de adsorção para o adsorvente contendo zinco. Foi adsorvido 36,6 mg/g para o biochar modificado por zinco preparado por pirólise de biomassa mediada por metais com imersão alcalina (ZnBC-OH), das concentrações trabalhadas entre 5 a 300 mg/L. Do mesmo modo, temos o estudo de M, Chen *et al.* (2024), os quais, utilizaram carvão ativado em sua composição, adquirindo uma capacidade de adsorção de fósforo de apenas 3,82 mg/g para o adsorvente carvão ativado de esterco de ovelha modificado a lantânio e magnésio (SDAC-La/Mg) em águas residuárias domésticas, com combinação dos mecanismos precipitação superficial, complexação e troca de ligantes, explicando a eficácia para tais resultados. No entanto, M, Chen *et al.* (2024) detectaram um alto potencial de regeneração do P, com possíveis aplicações como fertilizante no meio agrícola, para o crescimento de plantas.

Os óxidos metálicos como Ferro (Fe), Alumínio (Al) e Manganês (Mg) vem sendo frequentemente utilizados e chamando a atenção, por suas eficácias no tratamento de águas residuárias, em especial na remoção de fósforo e nitrogênio (Wei *et al.*, 2024). Dentre eles, o Ferro ganha destaque. Li *et al.* (2022) no contexto dos adsorventes híbridos, elaboraram um estudo com biochar modificado com ferro e nitrogênio (Fe/N@BC), apresentando uma altíssima capacidade de adsorção e uma de certa forma, eficiência na remoção de fósforo de 165,02 mg/g e 64,5%, respectivamente. Em um estudo mais recente de Beiyuan *et al.* (2024), trabalhando com biochar modificado com ferro e Manganês (Fe–MnBC), obtiveram módulos de capacidades inferiores ao estudo de Li *et al.* (2022), com apenas 135,88 mg/g, no entanto, não menos relevante, além de alcançar uma eficiência maior que 95,96% na medida que o pH fosse menor que 7 nos experimentos conforme explicitado na Tabela 3. Li *et al.* (2022) também observaram que após uma regeneração combinada, a eficiência na regeneração de fósforo foi para 93,5%, ressaltando também a taxa de 3,5% de lixiviação do ferro. Fazendo com que abrisse os leques para aplicação de Fe/N@BC para adsorver vários poluentes de soluções aquosas. No caso do uso de lodo de ETA como material adsorvente, a capacidade de remoção de fósforo está relacionada a presença de alumínio (Al) e/ou ferro (Fe) aplicado nos processos de coagulação/floculação do tratamento de água (Dahhou *et al.*, 2018; Shaikhiev *et al.*, 2023).

5.3 Aplicação de adsorventes alternativos para remoção de fósforo

Os materiais adsorventes alternativos vêm ganhando destaque nas últimas décadas, principalmente pela sua viabilidade econômica, disponibilidade regional e menor impacto ambiental, sendo assim, esses materiais incluindo resíduos orgânicos, subprodutos industriais e materiais naturais modificados, os quais podem apresentar boa capacidade de adsorção de fósforo com menor custo (Jha *et al.*, 2023). As argilas modificadas e os LDHs figuram entre os adsorventes mais eficazes, com capacidades de adsorção frequentemente superiores a 100 mg P/g. Combiná-los com biochar potencializa não apenas a eficiência, mas também facilita a recuperação e aplicação do fósforo obtido como fertilizante (Keyikoglu *et al.*, 2022).

Huang *et al.* (2024) conseguiram grandes resultados, no contexto de remoção de fósforo em águas residuárias, com faixa de 99-100% para LDH/PMA/BC. O mesmo adsorvente apresentou uma capacidade de adsorção de 109,9 mg/g pelo modelo de Langmuir. As condições operacionais a se destacar foram a dosagem, numa faixa relativamente baixa, variando de 0,1- 4 g/L e concentração entre 10-200 mg/L. Os autores afirmam que a adsorção em monocamada domina o processo de adsorção de fósforo (Huang *et al.*, 2024). Do mesmo modo, Hu *et al.* (2023) tinham essas mesmas condições em seus estudos, porém, obtiveram apenas 25,6 mg/g utilizando o modelo de Langmuir, o que pode se atribuir ao tipo de material.

Isso pode ser explicado devido ao tipo e características de material utilizado na produção do adsorvente, mesmo que ambos sejam alternativos. Hu *et al.* (2023) utilizaram biochar, escórias e resíduos industriais, diferente de Huang *et al.* (2024) que utilizou biochar em combinações com LDH e pirita, proporcionando melhores resultados. Liu *et al.* (2022) através do modelo de Langmuir, obtiveram resultado máximo de 51,79 mg/g para biochar de lodo de esgoto modificado e preparado à 700°C (DSBC 700), em efluente doméstico, sendo essa capacidade atribuída pelos autores devido a elevação do valor de pH e apresentando um altíssimo potencial de regeneração e reuso para o crescimento de plantas. Como observa von Sperling (2014), “a adoção de materiais adsorventes alternativos pode promover ganhos econômicos e ambientais significativos, especialmente quando integrados a estratégias de reuso e valorização de resíduos”. Elkhlifi *et al.* (2023) alcançaram uma capacidade de adsorção de 54,44 mg/g, também pelo modelo de Langmuir, com pH entre 3-7. Esse parâmetro confere com os estudos de Huang *et al.* (2024), conforme mostrado na Tabela 2. Yang *et al.* (2019) entregaram uma baixa capacidade de adsorção de 152,1mg/g para biochar derivado de talo de milho com diversas formas de hidróxidos duplos lamelares modificados com magnésio e

alumínio (B-Mg/AlLDH-1), mas obtiveram uma eficiência na remoção de fósforo de 92,9 para biochar derivado de talo de milho com diversas formas de hidróxidos duplos lamelares modificados com zinco e alumínio (B- Zn/Al-LDH-1).

A utilização do biochar produzido através da borra de café, vem ganhando espaço como uma alternativa sustentável e eficaz na remoção de fósforo em águas residuárias (Liua *et al.*, 2024). Estudos recentes mostram as vantagens que a modificação desse material com metais como Ca, Fe ou Mg aumenta significativamente sua capacidade de adsorção. H, Chen *et al.* (2024), trabalhando com biochar eficiente de borra de café co-modificado com Ca e Mg (CMBC), alcançaram uma capacidade máxima de adsorção de 144,31 mg/g na temperatura de 298,15K, equivalente a 25°C, em tempo de contato variando de 2 a 6 horas. A eficiência de remoção de fósforo não foi elencada no estudo, no entanto, os autores concluíram que há um alto potencial de regeneração, com aplicação como fertilizantes para o crescimento de plantas. A maioria dos estudos com adsorventes alternativos, tem como base o biochar em sua composição, seja em sua forma modificada ou não, para auxiliar na adsorção eficiente de fósforo em águas residuárias (Luo *et al.*, 2024). O biochar é importante devido suas peculiaridades, como estrutura porosa, alta área superficial, abundância de grupos funcionais e custo relativamente baixo, algo que é bem visto se tratando do panorama de remoção de contaminantes em águas residuárias (Wu *et al.*, 2024). Com base nisso, Huang *et al.* (2022) constatarem valores de 64,3 e 65 mg/g para carbonato de lantânio/biochar (LCB300) e hidróxido de lantânio/biochar (LHB800), respectivamente. Sendo o último citado, o que obteve melhores faixas de eficiência na remoção de fósforo, entre 90 e 100% nas faixas de pH 2-8 e dosagem de 10g/L, conforme exposto na Tabela 2.

O biochar oriundo da casca de ovo tem ganhado destaque na remoção de fósforo de águas residuárias devido ao seu elevado teor de cálcio, característica que favorece fortemente a captura de fosfatos por mecanismos de precipitação e complexação superficial (Li *et al.*, 2023). Além disso, a matriz carbonácea do biochar fornece sítios adicionais de adsorção e melhora a dispersão das espécies de cálcio, resultando em materiais com capacidade de remoção muito superior à de biochars não modificados. Essa combinação de mineralidade rica em Ca e estrutura carbonosa confere ao biochar de casca de ovo um desempenho robusto em ampla faixa de pH, característica essencial para aplicações em efluentes reais (Cao *et al.*, 2020). Com grande passagem da casca de ovo em seus estudos, Liua *et al.* (2024), apresentaram uma capacidade de adsorção de fósforo de 150,23 mg/g para o adsorvente Ca-PSB2, ainda observando uma eficiência na remoção de fósforo de 93,2% para Ca-PSB2. Os autores ainda destacam o alto

potencial de regeneração deste adsorvente, com potencial de reuso agrícola. Já Yang *et al.* (2021), obtiveram uma capacidade de 106,99 mg/g para EB 2:1, sendo que o mesmo adsorvente também apresentou uma ótima eficiência na remoção de fósforo, sendo superior a 96%, quando em concentrações maiores ou igual a 50 mg/L.

Conforme a Tabela 2, temos que Zhang *et al.*, 2024 atingiram como máxima capacidade de adsorção, uma taxa de 52,53 mg/g para biochar modificado com grupo amino e uma hidroxila (OH/NH₂@MBC), com uma dosagem 10 vezes menor que o estudo de Huang *et al.* (2022), revisando como a dosagem pode influenciar os resultados dos estudos de adsorção. Um ano antes, Zhang *et al.* (2023) havia evidenciado uma capacidade máxima de adsorção de 103 mg/g para biochar de origem vegetal preparado à 600°C (VBC600), um valor quase duas vezes superior ao do estudo mais recente. No entanto, trabalhando com faixas de pH de 8 a 12, e dosagem três vezes maior. Condições operacionais, as quais, já foram elencadas anteriormente, podem justificar essa alta capacidade de adsorção encontrada.

O biochar modificado apresenta elevada afinidade por fósforo, destacando-se também pelo baixo custo operacional e eficiência energética (Zhang *et al.*, 2024). Com base nos resultados obtidos na Tabelas 1, 2 e 3, temos que essa afinidade reflete diretamente nas capacidades e eficiências de adsorção. Através do modelo de Langmuir e em águas residuárias domésticas, Wen *et al.* (2021) obtiveram uma eficiência de remoção de 84,65 e 96,97% para águas residuárias domésticas brutas filtradas (FRDW) e águas residuárias domésticas tratadas (TDW), respectivamente, apresentando uma capacidade de adsorção de 69,80 mg/g, com melhor ajuste para o modelo de Langmuir, para o adsorvente quarta amostra de um carvão ativado derivado de um biochar modificado (MBAC4), apesar de apresentar tempos de contato fora dos padrões contidos na Tabela 2, 120-168 horas.

Revisão aponta que o biochar modificado com íons metálicos apresentam excelente estabilidade e alta capacidade de adsorção de fosfato, com baixo risco de lixiviação metálica, mesmo após múltiplos ciclos de uso (Kumari *et al.*, 2025). Em um estudo no início da década, J, Li *et al.* (2020) alcançaram uma eficiência na remoção de 98,89% para biochar de lodo de esgoto à 600 °C modificado com hidróxido de lantânio (La-600SS-OH), na concentração (mg/L) de 25 mg/L. Na medida que a concentração foi aumentando, a ineficiência na remoção de fósforo foi observada, para o mesmo adsorvente La-600SS-OH, foi obtida uma capacidade de adsorção de 93,91 mg/g pelo modelo de Langmuir. Não menos intrigante que os resultados de capacidade de adsorção e eficiência na remoção, temos a alta regeneração, com pouca probabilidade de ser lixiviado, como vemos na Tabela 2. Nos mesmos moldes, Yi *et al.*(2024)

verificaram uma eficiência de adsorção entre 72,52 e 100% para biochar modificado com Lantânio (La-MBC), no entanto, a capacidade de adsorção foi relativamente baixa, com apenas 27,49 mg/g. Assim como Yin *et al.* (2024) que conseguiram uma eficiência entre 80 e 96%, mas apresentou uma capacidade máxima de adsorção de 28,65 mg/g para biochar magnético dopado com óxido de magnésio (MgO) (MMBC) apresentando um alto potencial de regeneração e sustentabilidade, baixo custo e variabilidade, diferente de Yi *et al.* (2024) que apresentaram apenas um médio potencial e possível aplicação na purificação de águas residuárias, com baixo custo, economia de energia e alta eficiência. Para Yin *et al.* (2024) os poréns para obter uma melhor capacidade de adsorção para fósforo, estava ligado a dependência da troca de ligantes.

Ouyang *et al.* (2024) no pH 5, conseguiram uma capacidade de adsorção de fósforo de 88,2 mg/g para composto de biocarvão (LMB) carregado com carbonato de lantânio ($\text{La}_2(\text{CO}_3)_3$) e ferrita de manganês (MnFe_2O_4) ($\text{LMB}@\text{La}_2(\text{CO}_3)_3/\text{MnFe}_2\text{O}_4$), com eficiência de remoção de 99% para os pH na faixa de 4 a 6 e concentrações de 10 a 50 mg/L. No entanto, o potencial de regeneração foi considerado médio, com reuso não especificado, é notável a resistência ao ambiente aquático como vantagem. A eficiência de adsorção foi influenciada pelo pH inicial da solução, que também afetou a carga superficial do adsorvente e a forma química do adsorvedor, onde em condições neutras, aferiu-se um baixo grau de competição entre os íons e as espécies trabalhadas no estudo (Ouyang *et al.*, 2024). Sob condição de concentração similar, Hu *et al.* (2024) atingiram uma capacidade de adsorção de 53,1 mg/g no pH 1,4, no entanto, o destaque vai para 96% de eficiência na remoção de fósforo e para o alto potencial de regeneração, pois mesmo após cinco ciclos de adsorção-dessorção de fósforo, o adsorvente Zr- RB ainda apresentou bom desempenho de adsorção para fósforo, indicando sua alta estabilidade. A atração eletrostática e a troca de ligantes no adsorvente ZrRB foram as principais responsáveis pela adsorção de fósforo do lixiviado. Hu *et al.*, 2024 ainda reforçam que o potencial de aplicação da recuperação de produtos de fosfato de alumínio (AlPO_4) de alto valor de cinzas de lodo de esgoto incinerado (ISSA) com base no adsorvente Zr-RB. Outrora, também com pH em condições ácidas. Antunes *et al.* (2018) conseguiram adsorver 147 mg/g para o biochar com 20% de dióxido de cálcio (OH_2) (BC20) em pH 4. Eles observaram que na medida que foi aumentando o teor de cálcio no biochar, a capacidade de adsorção foi aumentando significativamente. Através do modelo de Langmuir e em águas residuárias sintéticas, Xu *et al.* (2023) apresentaram uma capacidade de adsorção de 149,27 mg/g para biochar magnético a partir de resíduos de casca de caranguejo (FBC600), sendo a

precipitação química, elencada como o principal mecanismo para a remoção de fósforo no estudo (Xu *et al.*, 2023).

5.4 Mecanismos predominantes no processo de adsorção

A troca iônica constitui um mecanismo central na adsorção de fosfato, ocorrendo quando os ânions fosfatados substituem outros íons (como Cl^- , SO_4^{2-} ou HCO_3^-) na superfície de adsorventes com cargas positivas. Com troca iônica dentre os mecanismos predominantes em seu estudo, Cuong *et al.* (2024) obtiveram uma eficiência na remoção de fósforo de 72,6%, visualizando apenas 17,91 mg/g para o sistema MAAC/AEM//CEM/AC, no entanto, a alta capacidade de adsorção não é uma marca dos adsorventes convencionais, neste caso, o carvão ativado. No estudo de Yang *et al.* (2018), os testes comparativos demonstraram que biochar à base de lodo ativado residual (WAS) impregnado com cloreto de ferro III (FeCl_3) (MB3), exibiu capacidade de adsorção de fósforo superior 111,0 mg/g em todas as etapas do estudo, tendo bom desempenho mesmo sob interferências de pH e íons coexistentes. Os mecanismos predominantes neste estudo foram a troca iônica, complexação e troca de ligantes. Este tipo de interação é típico em adsorventes baseados em óxidos/hidróxidos de ferro, alumínio ou cálcio, que formam complexos superficiais com alta afinidade por fósforo devido à sua polarização e estrutura química (Nadagouda *et al.*, 2024).

Podemos observar que essa afinidade, se reflete no estudo de Zhang *et al.* (2024), o qual, resultou em uma eficiência na remoção de fósforo em 92,36% para o biochar modificado e funcionalizado com grupos hidroxila e amina ($\text{OH}/\text{NH}_2@\text{MBC}$). Segundo Zhang *et al.* (2024), a dinâmica de troca iônica é fortemente influenciada pelo pH da solução, força iônica, seletividade dos sítios ativos e a estrutura cristalina do adsorvente. Em sistemas reativos contendo ferro ou cálcio, esse mecanismo pode atuar de forma sinérgica com outras rotas, como complexação ou precipitação superficial, ampliando a capacidade total de retenção do adsorvente (Jiang *et al.*, 2014). Sob esses conformes, Luo *et al.* (2024) alcançaram capacidades de adsorções de 122,7 e 109,17 mg/g, para zeólita natural modificada com lantânio (LZ) e zeólita magnética modificada com lantânio (LMZ), respectivamente, com eficiências na remoção de 94,5 e 98,2%. No entanto, o que os autores destacam, é a capacidade de adsorção destes materiais utilizados, das quais, a complexação na esfera interna e a atração eletrostática atuaram como os principais mecanismos que facilitaram a adsorção de fósforo. Cui *et al.* (2023)

experimentaram a junção de lantânio e ferro ao biochar, com mecanismo como complexação interna e troca de ligantes, obtiveram excelentes resultados pelo modelo de Langmuir, com 137,14 mg/g de capacidade de adsorção para o adsorvente biochar de lignina sulfonilmetilada modificada com lantânio-ferro bimetálico magnético (FLO@CSL), contendo uma eficiência na remoção de fósforo superior a 96% em todas as etapas dos experimentos. Vale ressaltar a provável aplicação do fósforo em ambientes aquáticos. Atribui-se a rápida adsorção de FLO@CSL aos sítios ativos de La/Fe amplamente

dispersos e à rica estrutura de poros do compósito (Cui *et al.*, 2023).

Com capacidade máxima de adsorção similar, 122,01 mg/g, Wu *et al.* (2024) através de seus estudos sobre adsorção e remoção de fósforo em águas residuárias, trabalhando com biochar de esterco suíno modificado com óxido de magnésio (MgO) (MgO-PMBC), obtiveram 97,57% de remoção para o adsorvente. Vale o destaque para o mecanismo predominante neste estudo, a precipitação. Hu *et al.* (2023) obtiveram apenas 25,6 mg/g de capacidade de adsorção com modelo de Langmuir e mecanismo de coprecipitação predominantes, os autores ressaltam o alto potencial de regeneração e de reuso agrícola do fósforo através do estudo. Yin *et al.* (2024) utilizaram biochar magnético dopado com óxido de magnésio (MgO) (MMBC) a fim de adsorver e remover fósforo de águas residuárias. Apesar de faixas de eficiência na remoção entre 80 a 96%, a capacidade de adsorção foi de apenas 28,65 mg/g para MMBC. Através dos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, os quais determinaram que os mecanismos predominantes no estudo de Yin *et al.* (2024), foram a precipitação e a troca de ligantes.

Tendo como mecanismos predominantes, a complexação interna e a troca de ligantes, Huang *et al.* (2022) evidenciaram valores de 64,3 e 65 mg/g para carbonato de lantânio/biochar (LCB300) e hidróxido de lantânio/biochar (LHB800), respectivamente. Sendo o último citado, o que obteve melhores faixas de eficiência na remoção de fósforo, entre 90 e 100% nas faixas de pH 2-8 e dosagem de 10g/L, conforme exposto na Tabela 2. Esses resultados mostram que da maneira que o lantânio se comporta no adsorvente afeta seu mecanismo de adsorção e a seletividade correspondente (Huang *et al.*, 2022).

Materiais à base de ferro zero-valente (Fe^0) geram superfícies carregadas positivamente em solução aquosa e mostram-se eficazes na remoção de fósforo por meio de combinação de troca iônica, precipitação e adsorção específica (Konadu-Amoah *et al.*, 2022). Na Tabela 1 observamos que He *et al.*, 2024 combinaram esses mecanismos em seus estudos, obtendo uma capacidade de adsorção de 1,60 mg/g e um alto potencial de regeneração, com

elevada reciclabilidade e estabilidade. Com melhores resultados de capacidade de adsorção, com 19,27 mg/g para biochar modificado com óxido de ferro III e óxido de magnésio (BC- γ -Fe₂O₃/MgO), comparado ao recente estudo de He *et al.* (2024), An *et al.*, (2022) evidenciaram uma eficiência na remoção de fósforo de 82,3%, trabalhando com Fe e Mg associados ao biochar. A presença do óxido de ferro III e óxido de magnésio (Fe₂O₃/MgO) na superfície do biochar, aprimora os desempenhos de adsorção de fósforo (An *et al.*, 2022). S, Li *et al.* (2022) inovaram na área da adsorção de fósforo, através de um estudo com biochar de platina modificado com La(OH)₃ magnético fraco (La-MB), os resultados foram de certa forma, expressivos, abrindo um leque de opções para o uso de lantânio nesses moldes. A capacidade de adsorção foi de 116 mg/g nas faixas de pH entre 3 e 9. O intrigante foi o tempo de contato, com apenas 45 min. Sendo essa capacidade maior do que a maioria dos adsorventes magnéticos modificados com La, até então.

O lantânio (La) tem se destacado como um dos metais mais eficientes na adsorção de fósforo devido à sua forte afinidade pelo íon fosfato (PO₄³⁻) (Zhao *et al.*, 2021). Além disso, sua incorporação em suportes como óxidos, hidróxidos ou biochars melhora a seletividade e estabilidade do material, reduzindo interferências de outros ânions (Hu *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2024). Em um dos estudos com adsorventes híbridos já citados anteriormente, temos o de M, Chen *et al.* (2024) os quais utilizaram lantânio em sua composição, adquirindo uma capacidade de adsorção de fósforo de 3,82 mg/g para o adsorvente SDAC-La/Mg em águas residuárias domésticas, com combinação dos mecanismos precipitação superficial, complexação e troca de ligantes, explicando a eficácia para tais resultados. A partir desses retornos, M, Chen *et al.* (2024) detectaram um alto potencial de regeneração do P, com possíveis aplicações como fertilizante no meio agrícola, para o crescimento de plantas. Em materiais adsorventes, o lantânio forma complexos estáveis como ortofosfato de lantânio (LaPO₄), resultando em elevada capacidade de remoção mesmo em ampla faixa de pH (Zhang *et al.*, 2024). Através de um estudo, com biochar de fibra de plátano modificado com lantânio (La-TC), Jia *et al.* (2020) atingiram 148,11 mg/g de capacidade de adsorção, na dosagem de 0,4 g/L e com pH 6, com 20 minutos de contato, números bem dispersos da maioria dos adsorventes de biochar para fosfato. Em concentrações entre 10 e 30 mg/L, o fósforo foi totalmente removido das águas residuárias, conforme elencado na Tabela 2. Esses números são bem dispersos da maioria dos adsorventes de biochar para fosfato (Jia *et al.*, 2020). Do mesmo modo, Huang *et al.* (2022) constataram valores de 64,3 e 65 mg/g para carbonato de lantânio/biochar (LCB300) e hidróxido de lantânio/biochar (LHB800), respectivamente. Sendo o último citado, o que obteve melhores

faixas de eficiência na remoção de fósforo, entre 90 e 100% nas faixas de pH 2-8 e dosagem de 10g/L, conforme exposto na Tabela 2. Esses resultados mostram que da maneira que o lantânio se comporta no adsorvente afeta seu mecanismo de adsorção e a seletividade correspondente (Huang *et al.*, 2022).

A atração eletrostática na adsorção de fósforo ocorre quando o adsorvente possui carga positiva em pH abaixo do ponto de carga zero, favorecendo a interação com íons fosfato negativos (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}). Esse mecanismo é dominante em meio ácido, onde as interações eletrostáticas promovem a retenção do fosfato na superfície do material. (Antelo *et al.*, 2005; Almasri *et al.*, 2019). Wang *et al.* (2024) apresentaram uma eficiência na remoção de P de 97,97% para gBC600-4B, com predominância de atração eletrostática, precipitação química e ligações de hidrogênio, como mecanismo de adsorção predominantes, como ressalta Wang *et al.* (2024) e conforme apresentado na Tabela 2. Segundo os autores, esse percentual de remoção de P, foi observado no pH 6, indicando que a atração eletrostática não foi a principal força motriz para a adsorção de fosfato, mas ainda teve um efeito notável.

Com predominância da atração eletrostática, como mecanismo de adsorção, seguido de troca de ligantes e complexação interna, J, Li *et al.* (2020) alcançaram uma eficiência na remoção de 98,89%, para o adsorvente biochar de lodo de esgoto à 600 °C modificado com hidróxido de lantânio (La-600SS-OH), foi obtido uma capacidade de adsorção de 93,91 mg/g pelo modelo de Langmuir, nas faixas de pH entre 3 e 6. Não menos intrigante que os resultados de capacidade de adsorção e eficiência na remoção, temos a alta regeneração, com pouca probabilidade de ser lixiviado, como vemos na Tabela 2. Através de outro estudo sobre adsorção de fósforo, Elkhilfi *et al.* (2022) constataram a dominância deste mecanismo em meios ácidos (2-5), com incríveis 312,55 mg/g para biochar de lodo de esgoto projetado com hidróxido de lantânio (La OH) (La-SSBC) pelo modelo de Langmuir, além de eficiências de remoção de fósforo entre 97,5 a 100%, com pH entre 2-10 a vantagem do adsorvente especificada pelos autores é a de processo exclusivo de dupla camada de captura de fosfato, fazendo jus aos ótimos resultados obtidos. Ambos os estudos citados utilizaram o lantânio como base em seus experimentos. O biochar de lodo de esgoto, foi de suma importância, liberando cátions carregados positivamente na solução, superando a repulsão eletrônica para assim formar uma segunda camada e alcançar uma exímia capacidade máxima de adsorção de fósforo (Elkhilfi *et al.*, 2022).

Através de outros estudos na área de adsorção de fósforo, com materiais modificados, Zhu *et al.* (2023) utilizaram lantânio e magnésio em sintonia, obtendo uma capacidade de

adsorção cinco vezes menor que a dos resultados encontrados por Elkhilfi *et al.* (2022), com 62,50 mg/g para o biochar magnético modificado com magnésio e lantânio (MBC/Mg-La-3), obtendo uma eficiência máxima de 98% a 10 mg/L para o mesmo adsorvente, com predominância dos modelos de Langmuir e Freundlich, conforme podemos visualizar na Tabela 2.

Zhu *et al.* (2023) reforçam que a capacidade de adsorção deste adsorvente, foi favorecida na medida que se modificaram com magnésio e lantânio. Sendo os mecanismos determinantes para este resultado na adsorção, a atração eletrostática, complexação interna e troca de ligantes, além de um alto potencial de regeneração, com aplicação do fósforo como fertilizante para o crescimento de plantas.

Já Beiyuan *et al.* (2024), adquiriram uma capacidade de adsorção altíssima de 135,88 mg/g, dessa vez, trabalhando com La e manganês (Mn) impregnados ao biochar. Entre vários adsorventes analisadas neste estudo, esse número de adsorção foi adquirido pelo adsorvente biochar modificado com ferro e manganês (Fe-MnBC), cuidadosamente projetado com estrutura e propriedades especiais, obteve uma eficiência na remoção de fósforo de maior do que 95,96% para pH em condições ácidas. A atração eletrostática junto da complexação interna foram os mecanismos de adsorção predominantes nestes processos. Beiyuan *et al.* (2024) destacam o alto potencial de regeneração de P, através do adsorvente Fe-MnBC, neste estudo, pois, em meio a 5 ciclos, ainda obteve uma eficiência de remoção superior a 81,34%, com alto teor de aplicação para controle da poluição em ambientes aquáticos, não menos importante, foi elencado a sua sustentabilidade, baixo custo e variabilidade.

A precipitação superficial é um fenômeno, o qual, ocorre quando há formação de compostos insolúveis diretamente sobre a superfície do adsorvente, resultando em uma camada sólida que se adere ao material adsorvente, contribuindo para a remoção do poluente da fase líquida (Wang *et al.*, 2018). Um estudo de Li *et al.* (2024), trabalhando com adsorventes convencionais e alternativos, como cálcio, alumínio, magnésio e zinco, tiveram como mecanismo de adsorção predominante, a precipitação superficial, obtendo valores de capacidade máxima de adsorção de 36,6 mg/g para ZnBC-OH, das concentrações trabalhadas entre 5 a 300 mg/L. X, Li *et al.* (2020) verificaram uma capacidade de adsorção de 213,22 mg/g, pelos modelos de Langmuir e Freundlich, também com a precipitação superficial como mecanismo predominante. No entanto, o potencial de regeneração de fósforo neste estudo foi considerado médio, com incertezas quanto a sua aplicação como fertilizante, conforme explicitado na Tabela 2.

Trabalhando com casca de ovo em seus estudos, Liua *et al.* (2024), apresentaram uma capacidade de adsorção de fósforo de 150,23 mg/g para o adsorvente Ca-PSB2, ainda observando uma eficiência na remoção de fósforo de 93,2% para Ca-PSB2. Os autores ainda destacam o alto potencial de regeneração deste adsorvente, com potencial de reuso agrícola. Os mecanismos predominantes neste estudo foram a precipitação e complexação superficial. Do mesmo modo, Yang *et al.* (2021), evidenciaram uma capacidade de 106,99 mg/g para EB 2:1, também apresentaram uma ótima eficiência na remoção de fósforo, sendo superior a 96%, quando em concentrações maiores ou igual a 50 mg/L. Assim como no estudo de Liua *et al.* (2024), os mecanismos de adsorção predominantes foram a precipitação e complexação superficial.

5.5 Influência das condições operacionais no desempenho dos adsorventes

O pH representa um dos principais parâmetros de controle em sistemas aquosos, pois determina o grau de acidez ou alcalinidade da solução e interfere diretamente nas reações químicas e na eficiência dos processos de tratamento (Kumari *et al.*, 2025). Em especial, influencia a solubilidade dos íons e o desempenho de materiais adsorventes na remoção de contaminantes, como o fósforo (Zeng *et al.*, 2024). Como vemos na Tabela 1, no estudo de Ilham *et al.* (2024) com carvão ativado, vemos uma eficiência máxima na remoção de fósforo, em pH 7 de 99,94%. Com o mesmo material de origem, Cuong *et al.* (2024) alcançaram apenas 72,6% de eficiência na remoção, porém trabalhou nas faixas de pH de 3 a 11. No estudo de Yang *et al.* (2018), os testes comparativos demonstraram que biochar à base de lodo ativado residual (WAS) impregnado com cloreto de ferro III (FeCl₃) (MB3), exibiu capacidade de adsorção de fósforo superior 111,0 mg/g em todas as etapas do estudo, tendo bom desempenho mesmo sob interferências de pH e íons coexistentes. O pH trabalhado neste estudo, foi na faixa de 2 a 9.

A remoção de fósforo é favorecida com pH na faixa de 6 e 7, no entanto, na medida que se torne muito ácido ou muito alcalino, a eficiência na remoção cai (Awual *et al.*, 2019). Mitrogiannis *et al.* (2017) trabalhando com pH nas faixas de 5-10, nem tão ácido e mais próximo das faixas de 6 e 7, as quais, favorecem uma melhor eficiência. Em cima disso, obtiveram 97,6% de eficiência na remoção de fósforo. Em pH alcalino, o processo é dificultado devido à repulsão eletrostática entre o ânion fosfato e as superfícies carregadas negativamente (von Sperling, 2014). Através de estudos com Lodo de ETA, Li *et al.* (2024) atingiram 95% de

remoção de P, em pH 7, na medida que nos experimentos, o pH elevou a eficiência caiu para 90%. Conforme está inserido na Tabela 2, os melhores resultados vieram na faixa de pH de 6 a 8. Li *et al.* (2022) alcançaram uma ótima capacidade de adsorção de 165,02 mg/g para Fe/N@BC. No entanto, a eficiência foi relativamente baixa, comparado ao estudo de Li *et al.* (2024), com 64,5%. Todavia, Li *et al.* (2022) observaram que após uma regeneração combinada, a eficiência na regeneração de fósforo foi para 93,5%, ressaltando também a taxa de 3,5% de lixiviação do ferro. Fazendo com que abrisse os leques para aplicação de Fe/N@BC para adsorver multipoluentes de soluções aquosas.

Quando em pH em meio ácidos ou neutros (3-7), os valores de capacidade de adsorção e eficiência na remoção de P, foram os melhores encontrados. Todavia, na medida em que o pH ficou nas faixas de 7 a 11, assumindo suas condições alcalinas, a eficiência na remoção de fósforo caiu bruscamente (Li *et al.*, 2022). Segundo Sperling (2014), “o pH exerce grande influência sobre os processos de adsorção devido às mudanças nas cargas das superfícies sólidas e nas formas químicas dos solutos em solução”. No estudo de Wu *et al.* (2024), com pH neutros, eles atingiram uma capacidade de adsorção de 122,01 mg/g e eficiência de 97,57% na remoção de fósforo através do adsorvente MgO-PMBC. Vale ressaltar que segundo os autores, o único mecanismo determinante para esses valores encontrados foi a precipitação.

O equilíbrio entre o adsorvato e o adsorvente é atingido através de um tempo de contato específico, com a cinética de adsorção sendo caracterizada por duas fases, inicialmente, uma fase rápida, posteriormente, uma fase lenta (von Sperling *et al.*, 2014). S, Li *et al.* (2022) obtiveram uma capacidade de adsorção de 116 mg/g com tempo de contato de apenas 45 minutos, num estudo com biochar de platina modificado com La(OH)₃ magnético fraco (La-MB). Elkhilifi *et al.* (2022) observaram 312,55 mg/g de capacidade de adsorção para La- SSBC. trabalhando em pH de 2 a 10. O biochar de lodo de esgoto, foi de suma importância, liberando cátions carregados positivamente na solução, superando a repulsão eletrônica para assim formar uma segunda camada e alcançar uma exímia capacidade máxima de adsorção de fósforo (Elkhilifi *et al.*, 2022). No entanto, metade deste resultado expressivo de adsorção, foi obtido em 60 minutos de contato, conforme apresentado na Tabela 2. Yang *et al.* (2021), obtiveram uma capacidade de 106,99 mg/g para EB 2:1, sendo que o mesmo adsorvente também apresentou uma ótima eficiência na remoção de fósforo, sendo superior a 96%, quando em concentrações maiores ou igual a 50 mg/L. O que também se destaca neste estudo, foi o tempo de contato para obtenção destes resultados, 120 a 240 minutos, conforme podemos visualizar na Tabela 2.

Em contrapartida aos estudos de S, Li *et al.* (2022) e Elkhilifi *et al.* (2022), com baixa

capacidade de adsorção, Yin *et al.* (2024) utilizaram biochar magnético dopado com óxido de magnésio (MgO) (MMBC) afim de adsorver e remover fósforo de águas residuárias. Apesar de faixas de eficiência na remoção entre 80 a 96%, a capacidade de adsorção foi de apenas 28,65 mg/g para MMBC, mesmo com o tempo de contato baixo, como o dos dois estudos citados no início do parágrafo. A baixa capacidade de adsorção observada em tempos curtos pode estar relacionada à limitada disponibilidade de sítios ativos na superfície do material, baixa afinidade entre o adsorvente e o fósforo, ou ainda à difusão lenta das moléculas adsorvidas até os poros internos (Yin et al, 2024). Essa característica reforça a importância de se determinar o tempo ótimo de operação para garantir máxima remoção de fósforo sem desperdício de energia ou material.

A concentração inicial de fósforo em águas residuárias é um fator crucial que influencia os processos de adsorção e remoção desses nutrientes. Estudos indicam que a capacidade adsorvente e a eficiência de remoção do fósforo estão diretamente relacionadas à concentração inicial de fosfato presente na solução (Nobaharan *et al.*, 2021). Em cima disso, com material de origem, a zeólita natural, Luo *et al.* (2024) atingiram esses aspectos citados por Nobaharan *et al.*(2021), com 122,7 mg/g para zeólita natural modificada com lantânio (LZ) e 109,17 mg/g para zeólita magnética modificada com lantânio (LMZ), além de eficiências na remoção de fósforo de 94,5 e 98,2%, para LZ e LMZ, respectivamente, trabalhando com concentrações até 10 mg/L. Através de um estudo adjunto ao biochar modificado com lantânio (La-MBC), Yi *et al.* (2024) atingiram uma alta faixa de remoção de fósforo, entre 80 e 96%, com concentrações similares ao estudo de Luo *et al.* (2024), ou seja, concentrações baixas, entre 0,5 e 25 mg/L, obtiveram apenas 27,49 mg/g para La-MBC pelo modelo de Langmuir. H, Chen *et al.* (2024), trabalhando com CMBC, alcançaram uma capacidade máxima de adsorção de 144,31 mg/g com concentração inicial de 10 mg/L, conforme pode ser visualizado na Tabela 2. A eficiência de remoção de fósforo não foi elencada no estudo, no entanto, os autores concluíram que há um alto potencial de regeneração, com aplicação como fertilizantes para o crescimento de plantas.

Conforme previsto nas Tabelas 1, 2 e 3, quando as concentrações iniciais para os estudos inseridos, iguala ou ultrapassa 10 mg/L, ou seja, se torna uma concentração inicial alta, temos um aprimoramento na maioria dos estudos, em relação aos dados de adsorção e remoção de fósforo. Li *et al.* (2022), assim como Luo *et al.* (2024) trabalharam com biochar modificado com lantânio (La-MB), observando 116 mg/g de capacidade de adsorção e eficiência na remoção de fósforo de 98%. A mesma, similar a um estudo mais recente de Wu *et al.* (2024) com 97,57% para o adsorvente biochar de esterco suíno modificado com óxido de magnésio

(MgO) (MgO- PMBC), mantendo êxito também para a capacidade de adsorção, com 122,1 mg/g.

No mesmo contexto dos adsorventes alternativos elaborados com materiais modificados, temos os bons resultados obtidos por Beiyuan *et al.* (2024), alcançando 135,88 mg/g de capacidade de adsorção e uma eficiência na remoção de fósforo de mais de 95,96%, já trabalhando com concentrações iniciais de 15 mg/L, conforme visualizamos na Tabela 3. Ainda trabalhando com 10 mg/L, Zhu *et al.* (2023) e An *et al.* (2022) obtiveram bons dados de eficiência na remoção de fósforo, com 98 e 82,3%, respectivamente, ambas as eficiências respectivas aos adsorventes utilizados, MBC/Mg-La-3 e BC- γ -Fe₂O₃/MgO. No entanto, podemos visualizar na Tabela 3, que o resultado máximo de capacidade de adsorção no estudo de An *et al.* (2022) foi de apenas 19,27 mg/g. Os autores reforçam que essa baixa na capacidade se deve ao fato de possíveis limitações na disponibilidade e natureza dos sítios ativos do adsorvente.

Para os materiais convencionais, neste caso, o carvão ativado, temos o estudo de Cuong *et al.* (2024), que obteve uma baixa adsorção, de 17,91 mg/g, apresentando uma eficiência na remoção de fósforo de 72,6%, para MAAC/AEM//CEM/AC. As concentrações trabalhadas neste estudo foram nas faixas de 10 a 100 mg/L. Isso pode ser explicado pelo material ter se saturado ao longo dos processos. Huang *et al.* (2024) estudaram a adsorção de P com compósitos híbridos, e efetivaram os argumentos de Guerra (2020), apresentando uma capacidade de adsorção e eficiência de remoção de 109,9 mg/g e 99-100%, respectivamente, para biochar junto à argilas modificadas e LDH (LDH/PMA/BC), nas concentrações iniciais de 10 mg/L. Mesmo que a concentração final foi de 200 mg/L, o adsorvato não se saturou e apresentou grande potencial de regeneração, mostrando ser uma solução útil para o controle da poluição em ambientes aquáticos, conforme informa Huang *et al.* (2024).

Nas faixas de 10-50 mg/L, Elkhilfi *et al.* (2023) obtiveram 54,44 mg/g, através do modelo de Langmuir. Como parâmetro, podemos destacar que em ambos os estudos atingiram seus máximos valores nas faixas de pH entre 3 e 7, inferindo que o diferencial nessas capacidades de adsorção, pode ter sido as faixas de concentração. Outro fator determinante pode ter sido o mecanismo predominante no processo de adsorção de fósforo (Elkhilfi *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2024). Liu *et al.* (2022) também através do modelo de Langmuir, obtiveram resultado máximo de 51,79 mg/g para DSBC700, em efluente doméstico, neste caso a concentração inicial foi de 1 mg/L, diferindo das concentrações iniciais e resultados obtidos nos estudos de Elkhilfi *et al.* (2023) e Huang *et al.* (2024). No entanto, Liu *et al.* (2022) destacaram um altíssimo

potencial de regeneração de fósforo, sendo reutilizado como fertilizante para o crescimento de plantas e que a adsorção de fosfato do biochar foi fortalecida com o aumento do pH.

Os modelos de Langmuir e Freundlich foram predominantes em um estudo com materiais modificados de X, Li *et al.* (2020), dessa vez, trabalhando com concentrações nas faixas de 200- 1000 mg/L, ou seja, concentração inicial altíssima, obtendo uma capacidade de adsorção de fósforo de 213,22 mg/g, um dos maiores resultados, dos inseridos nas Tabelas 1, 2 e 3. Do mesmo modo, Beiyuan *et al.* (2024) atingiram 135,88 mg/g para biochar modificado com ferro e manganês (Fe-MnBC), realçando uma eficiência na remoção de fósforo superior a 95,96% para pH em meio ácido. Mostra um alto potencial de regeneração, podendo ser utilizado no controle da poluição em ambientes aquáticos, se destacando também pela sua sustentabilidade, baixo custo e variabilidade (Beiyuan *et al.*, 2024). Com grande passagem da casca de ovo em seus estudos, Liua *et al.* (2024), apresentaram uma capacidade de adsorção de fósforo de 150,23 mg/g para o adsorvente Ca-PSB2, ainda observando uma eficiência na remoção de fósforo de 93,2% para Ca-PSB2. As concentrações para os resultados obtidos neste estudo foram nas faixas de 50 a 200 mg/L. Os autores ainda destacam o alto potencial de regeneração deste adsorvente, com potencial de reuso agrícola.

A temperatura é de extrema importância e remete certa influência, tanto a velocidade das reações quanto a difusão dos íons nos poros do adsorvente, intensificando a maleabilidade das moléculas, favorecendo a adsorção (Mezenner e Bensedrira, 2020). No estudo de Ouyang *et al.* (2024), eles obtiveram uma capacidade de adsorção de 88,2 mg/g na temperatura de 25°C, trabalhando com LMB@La₂(CO₃)₃/MnFe₂O₄. Dessa vez, trabalhando com zeólita natural, Mitrogiannis *et al.* (2017) apresentaram ótimos resultados para eficiência de remoção de P, com 97,6%. No entanto, obtiveram resultados bem inferiores de adsorção, com apenas 9,66 mg/g na temperatura de 308K, o equivalente a 34,85°C. Ou seja, uma temperatura superior aos estudos de Ouyang *et al.* (2024), mas apresentou uma capacidade máxima de adsorção muito baixa. Essa não compatibilidade com as características apresentadas sob elevadas temperaturas no processo de adsorção de fósforo, pode ser explicada pelos adsorventes convencionais quase sempre não obterem capacidades máximas de adsorção elevadas. Assim como Ouyang *et al.* (2024), os quais, obtiveram valor de capacidade máxima de adsorção em 25°C, H, Chen *et al.* (2024), para CMBC, alcançaram uma capacidade máxima de adsorção de 144,31 mg/g com tempo de contato variando de 2 a 6 horas. A eficiência de remoção de fósforo não foi elencada no estudo, no entanto, os autores concluíram que há um alto potencial de regeneração, com aplicação como fertilizantes para o crescimento de plantas.

O melhor resultado para capacidade de adsorção, foi encontrado na Tabela 2, com incríveis 312,55 mg/g em um estudo de Elkhilfi *et al.* (2022) com La-SSBC pelo modelo de Langmuir, assim como a massa superior dos estudos contidos nas Tabelas 1, 2 e 3. Neste estudo, a dosagem que resultou nesses valores da capacidade de adsorção foi de 1 a 40 g/L. Jia *et al.* (2020) também trabalhando com lantânio, em sua composição, alcançaram a remoção total de fósforo (100%), em um efluente doméstico analisado. A capacidade de adsorção corresponde a duas vezes menos que o estudo de Elkhilfi *et al.* (2022), com 148,11 mg/g para o adsorvente biochar de fibra de plátano modificado com lantânio (La-TC), porém ainda é um valor bastante relevante no contexto de adsorção de fósforo. Com essa eficiência de 100%, com dosagem nas faixas de 0,4 a 1 g/L. O alto potencial de regeneração é bem notável para este estudo, com reuso sendo ligado a purificação de águas residuárias. O biochar de lodo de esgoto, foi de suma importância, liberando cátions carregados positivamente na solução, superando a repulsão eletrônica para assim formar uma segunda camada e alcançar uma exímia capacidade máxima de adsorção de fósforo (Elkhilfi *et al.*, 2022).

Com dosagem de 1 g/L em seus estudos, Zhang *et al.* (2024) entregaram uma eficiência na remoção de fósforo de 92,36% para biochar modificado com grupo amino e uma hidroxila (OH/NH₂@MBC), apresentando uma capacidade de adsorção de 52,53 mg/g para o mesmo adsorvente. Zhang *et al.* (2024) notaram que o adsorvente estudado, OH/NH₂@MBC, exibiu uma seletividade superior na adsorção de fósforo na presença de vários ânions coexistentes Já Xu *et al.* (2023) observaram uma capacidade de adsorção de 149,27 mg/g, através do modelo de Langmuir, trabalhando com uma dosagem dez vezes menor.

5.6 Principais modelagens isotérmicas e cinéticas nos estudos de adsorção de fósforo

As isothermas de Langmuir e Freundlich são amplamente aplicadas na modelagem da adsorção, pois permitem compreender as interações entre o adsorvente e o contaminante, bem como estimar a capacidade e o tipo de superfície envolvida no processo (Chung *et al.*, 2015). No contexto dos adsorventes alternativos, temos estudos com biochar, escórias e resíduos industriais que tinham como modelos predominantes para adsorção de P, as isothermas de Langmuir e/ou Freundlich. Hu *et al.* (2023) obtiveram apenas 25,6 mg/g de capacidade de adsorção com o modelo de Langmuir predominante, os autores ressaltam o alto potencial de regeneração e de reuso agrícola do fósforo através do estudo.

Segundo os dados contidos nas Tabelas 2 e 3, essas isothermas (Langmuir e Freundlich)

estão mais predominantes nos estudos com materiais modificados. Ouyang *et al.* (2024) obtiveram 88,2 mg/g de fósforo adsorvido por LMB@La₂(CO₃)₃/MnFe₂O₄, com eficiência de remoção na faixa de 66-100%, com predominância das isothermas de Langmuir e Freundlich, em pH em meio ácido de 4 a 6. Vale ressaltar que estes não são os únicos modelos presentes no estudo de Ouyang *et al.* (2024), como podemos visualizar na Tabela 2. Seguindo o contexto dos materiais modificados, Wen *et al.* (2021) evidenciou 64,80 mg/g para a quarta amostra de um carvão ativado derivado de um biochar modificado (MBAC4). Esse resultado é duas vezes menor do que o encontrado por Xu *et al.* (2023), com 149,27 mg/g para FBC600. Ambos os estudos citados, tiveram a predominância apenas do modelo de Langmuir. Os valores dispersos, revelam que os modelos isotérmicos não são fatores determinantes na capacidade de adsorção de fósforo.

Com melhor ajuste para o modelo de Freundlich, Ilham *et al.* (2024) apresentaram uma baixa capacidade de adsorção de fósforo, trabalhando com o material convencional, carvão ativado, com 19,84 mg/g, no entanto, ganha destaque a eficiência na remoção de fósforo com 99,94%, algo que é característica dos estudos com carvão ativado. Seguindo no contexto dos materiais convencionais, nós temos um estudo de Cuong *et al.* (2024), o qual, observaram uma capacidade de adsorção similar, com 17,91 mg/g, no entanto, uma eficiência de remoção de 72,6% para a junção de um eletrodo de carvão ativado (MAAC), membrana de troca aniônica (AEM), membrana de troca catiônica (CEM) e carvão ativado (AC) (MAAC/AEM//CEM/AC). Segundo a Tabela 1, os melhores resultados tanto para adsorção, quanto para remoção de fósforo, foram obtidos no estudo de Luo *et al.* (2024), onde os mesmos, trabalharam com zeólita natural, mais precisamente com dois adsorventes zeólita natural modificada com lantânio (LZ) e zeólita magnética modificada com lantânio (LMZ), alcançando capacidades de adsorção de 122,7 e 109,17, para LZ e LMZ, respectivamente, apresentando ótimas eficiências na remoção de 94,5% para LZ e 98,2% para LMZ. dessa vez, com o modelo de Langmuir predominante. Nesse sentido, temos o estudo de Chen *et al.* (2024), os quais, trabalharam com adsorventes híbridos em seus estudos. No mais, veremos que os modelos isotérmicos ajustam melhores resultados, principalmente de capacidade de adsorção para os materiais alternativos. Sob essa perspectiva, Antunes *et al.* (2018) alcançaram 147 mg/g utilizando BC20, se ajustando bem para os modelos de Langmuir e Freundlich. Do mesmo modo, X, Li *et al.* (2020) atingiram valores superiores ao de Antunes *et al.* (2018), com 213,22. O que difere os dois estudos citados são os mecanismos predominantes em cada estudo, no de Antunes *et al.* (2018), prevaleceu a precipitação química e complexação, já no de X, Li *et al.* (2020), apenas a

precipitação, devido às altas concentrações trabalhadas, de 200 a 1000 mg/L. No estudo de Antunes *et al.* (2018) a concentração final foi dez vezes menor que das concentrações finais de X, Li *et al.* (2020).

Em estudos de biochar sendo impregnado a metais, como o ferro, por exemplo, temos uma visualização ampla das modelagens de Langmuir e Freundlich em sintonia, Li *et al.* (2022) em seu estudo com Fe/N@BC, apresentaram uma altíssima capacidade de adsorção e uma de certa forma, eficiência na remoção de fósforo de 165,02 mg/g e 64,5%, respectivamente. Em um estudo mais recente de Beiyuan *et al.* (2024), trabalhando com biochar modificado com ferro e Manganês (Fe–MnBC), obtiveram módulos de capacidades inferiores ao estudo de Li *et al.* (2022), com apenas 135,88 mg/g, no entanto, não menos relevante, além de alcançar uma eficiência maior que 95,96% na medida que o pH fosse menor que 7 nos experimentos conforme explicitado na Tabela 3. Vale ressaltar que em ambos os estudos retratados neste parágrafo, podemos observar a predominância da atração eletrostática.

Desta vez, com melhor modelagem de Langmuir, Zhang *et al.* (2023) trabalhando com biochar de origem vegetal preparado à 600°C (VBC600) notaram uma capacidade máxima de adsorção de 103 mg/g. De maneira semelhante, Huang *et al.* (2024) apresentaram uma capacidade de adsorção e eficiência de remoção de 109,9 mg/g e 99-100%, respectivamente, para biochar junto à argilas modificadas e LDH (LDH/PMA/BC). Números excelentes, reforçando o porquê que o modelo de Langmuir é predominante na maioria dos estudos sobre adsorção e remoção eficiente de fósforo. Um ano antes, Cui *et al.* (2023) haviam evidenciado uma eficiência na remoção de fósforo superior a 96% durante vários ciclos, se mostrando ter um alto potencial de regeneração para fósforo, podendo ser aplicado em colunas de leito fixo. A capacidade máxima de adsorção obtida neste estudo foi de 113,48 mg/g para FLO@CSL pelo modelo de Langmuir. Wang *et al.* (2024) apresentaram uma eficiência na remoção de P de 97,97% para biochar carregado com ferro (Fe) e cálcio (Ca) (gBC600-4B), com predominância de atração eletrostática, precipitação química e ligações de hidrogênio, como mecanismo de adsorção predominantes, como ressalta Wang *et al.* (2024) e conforme apresentado na Tabela 2. Os resultados obtidos neste estudo combinaram o modelo cinético de pseudo-segunda ordem, o modelo de adsorção isotérmica de Sips e a análise termodinâmica. O modelo de Sips está presente unicamente neste estudo e de todos contidos nas Tabelas 1, 2 e 3.

Em estudo de biochar sendo elaborado com compósitos híbridos, podemos elencar o de Huang *et al.* (2024), que teve como único mecanismo de adsorção, as ligações de hidrogênio, evidenciaram uma capacidade máxima de adsorção de 109,9 mg/g para o adsorvente

LDH/PMA/BC. As argilas modificadas e os LDHs figuram entre os adsorventes mais eficazes, com capacidades de adsorção frequentemente superiores a 100 mg P/g. Combiná-los com biochar potencializa não apenas a eficiência, mas também facilita a recuperação e aplicação do fósforo obtido como fertilizante. (Keyikoglu et al, 2022).

O La tem se destacado como um dos metais mais eficientes na adsorção de fósforo devido à sua forte afinidade pelo íon fosfato (PO_4^{3-}) (Zhao *et al.*, 2021). Nesse sentido, Elkhilfi *et al.* (2022) trabalhando com o adsorvente La-SSBC, alcançaram uma capacidade de adsorção de 312,55 mg/g, com melhores ajustes pelo modelo de Langmuir. Do mesmo modo, J,Li *et al.* (2020) observaram 93,91 mg/g para biochar de lodo de esgoto à 600 °C modificado com hidróxido de lantânio (La-600SS-OH) apresentando uma excelente eficiência na remoção de fósforo de 98,89%. Já Li *et al.* (2022) conseguiram remover 98% de fósforo em águas residuárias domésticas, trabalhando com biochar modificado com lantânio (La-MB), com capacidade de adsorção de 116 mg/g, um pouco maior que os resultados do estudo de J,Li *et al.* (2020), os quais, obtiveram 93,91 mg/g para (La-600SS-OH). Em ambos os estudos citados por último, o modelo que mais se ajustou foi o de Langmuir, como vemos na Tabela 2, dada assim, a sua predominância. Vale ressaltar que não foi o único mecanismo predominante nos estudos, tendo em vista, que o modelo cinético pseudo-segunda ordem e pseudo-terceira ordem estavam presentes dentre os mecanismos mais importantes.

Os modelos cinéticos são fundamentais para compreender a velocidade e os mecanismos que controlam a adsorção de fósforo em águas residuárias, permitindo identificar etapas como difusão e interações químicas, além de prever o tempo necessário para atingir o equilíbrio (Edet *et al.*, 2020). Ao aplicar modelos como o de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, torna-se possível otimizar as condições operacionais e projetar sistemas mais eficientes para a remoção de fósforo em efluentes (Bouamra et al, 2018). Vemos na Tabela 2, que em alguns estudos, os modelos cinéticos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem estão juntos entre os ajustes importantes. No estudo de Huang *et al.*, 2022, esses modelos são os mais predominantes, detectando a complexação interna e troca iônica, como os mecanismos determinantes para os resultados obtidos. Dois adsorventes se destacaram neste estudo, na eficiência na remoção de fósforo, o adsorvente (LCB300) alcançou faixas de 73 a 100%, enquanto (LHB800) teve 90 a 100%. Ainda neste estudo, obtiveram capacidades máximas de adsorção moderadas, comparadas aos demais estudos com adsorventes alternativos, com 64,3 e 65 mg/g para LCB300 e LHB800, respectivamente.

A modelagem cinética é de suma importância em prol do comportamento do sistema,

onde melhora a avaliação das taxas de remoção (Valença, 2023). Os mecanismos de adsorção, complexação interna e troca iônica estão inseridos junto a um ou mais mecanismos, em quatro estudos, como vemos na Tabela 2. Xu *et al.* (2023) com a modelagem isotérmica de Langmuir e cinética de pseudo-segunda ordem, obtiveram 149,27 mg/g para FBC600, o melhor ajuste foi para o modelo de Langmuir, no entanto, pseudo-segunda ordem diferiu a precipitação, complexação interna e troca iônica como mecanismos determinantes para os resultados obtidos neste estudo. trabalhando com biochar à base de lodo ativado residual (WAS) impregnado com cloreto de ferro III (FeCl₃) (MB3), Yang *et al.* (2018) obtiveram uma capacidade máxima de adsorção não menos relevante, com 111 mg/g, com eficiência de remoção de fósforo superior a 60% nas concentrações de 5 a 1000 mg/L, como vemos na Tabela 2. Mesmo que nesse estudo, o modelo que mais se ajustou foi o Langmuir, o de Freundlich, pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem estavam presentes.

Assim como Xu *et al.* (2023), os quais, pela modelagem cinética de pseudo-segunda ordem detectaram a precipitação, complexação interna e troca iônica como fatores determinantes para os resultados em seus estudos, Yang *et al.* (2024) através do adsorvente BCp-N-600 observaram uma capacidade de adsorção de 42,3 mg/g desta vez, trabalhando com lodo de ETA como material de origem. Neste estudo é destacável o alto potencial de regeneração de fósforo, podendo ser enquadrado como um ortofosfato inorgânico, como afirmam Yang *et al.* (2024). O quarto estudo elencado nesta relação entre complexação interna e troca iônica, teve como predominância e modelo único, o de Elovich, o qual, aparece raramente nas tabelas trabalhadas neste trabalho. Neste estudo, feito por Yang *et al.* (2019) trabalhando com compósitos híbridos, entregaram uma baixa capacidade de adsorção de 152,1 mg/g para B-Mg/AlLDH-1, mas obtiveram uma eficiência na remoção de fósforo de 92,9% para B-Zn/Al-LDH-1.

O modelo de Elovich, aparece raramente nas tabelas trabalhadas neste trabalho. Jia *et al.* (2020) trabalharam com modelos de Langmuir, Elovich e pseudo-segunda ordem, em seus estudos. Para La-TC observaram uma capacidade de adsorção de 148,11 mg/g e uma remoção total entre 10 e 30 mg/L. Através de outro estudo sobre adsorção de fósforo, Elkhilfi *et al.* (2022) constataram a dominância deste mecanismo em meios ácidos (2-5), com incríveis 312,55 mg/g para biochar de lodo de esgoto projetado com hidróxido de lantânio (La OH) (La-SSBC) pelo modelo de Langmuir, além de eficiências de remoção de fósforo entre 97,5 a 100%, com pH entre 2-10 a vantagem do adsorvente especificada pelos autores é a de processo exclusivo de dupla camada de captura de fosfato, fazendo jus aos ótimos resultados obtidos. O

modelo de Langmuir obteve melhor ajuste, no entanto, o modelo pseudo-segunda ordem, apresentou um ajuste preciso, pois nos cálculos experimentais, os resultados foram de 311, 13 mg/g, ou seja, muito próximo do resultado encontrado com o adsorvente La-SSBC, neste estudo.

5.7 Potencial de regeneração e reaproveitamento dos adsorventes

A regeneração de adsorventes constitui um parâmetro fundamental para avaliar sua viabilidade econômica e ambiental, uma vez que determina o potencial de reutilização após a saturação. Em estudos correlatos, Silva (2016) menciona a comparação do desempenho antes e depois da regeneração com NaOH, embora sem fornecer detalhes operacionais relevantes, enquanto Valença (2023), ao analisar o uso de zeólitas para captura de CO₂, reforça que processos regenerativos por variação de temperatura ou pressão são indispensáveis para adsorventes porosos convencionais. A eficácia da regeneração está diretamente condicionada à reversibilidade dos processos adsorptivos, sobretudo quando predominam mecanismos de fisissorção, e depende também da estabilidade cíclica, da queda de eficiência ao longo dos ciclos e das propriedades físico-químicas dos regenerantes utilizados (Valença, 2023). No contexto dos adsorventes híbridos e baseados em materiais carbonáceos modificados, a literatura evidencia não apenas elevada capacidade de regeneração, mas também a possibilidade de destinação final como fertilizante, o que agrega valor ambiental e econômico ao processo.

Entre os materiais estudados, destaca-se o carvão ativado de esterco de ovelha modificado a lantânio e magnésio (SDAC-La/Mg), desenvolvido por M. Chen *et al.* (2024), que atingiu capacidade de adsorção de 3,82 mg/g em águas residuárias domésticas. Os mecanismos predominantes como a precipitação superficial, complexação e troca de ligantes, favoreceram não apenas a eficiência de remoção, mas também o alto potencial de regeneração do fósforo, permitindo sua reutilização agrícola para promoção do crescimento vegetal. Esse aspecto evidencia uma vantagem importante: a reciclagem do fósforo adsorvido, reduzindo a necessidade de fontes minerais não renováveis e proporcionando destinação final ambientalmente adequada. Resultados semelhantes são observados para argilas modificadas e hidróxidos duplos em camadas (LDHs), cuja elevada capacidade de adsorção, frequentemente superior a 100 mg P/g, associa-se à boa recuperabilidade do material. Keyikoglu *et al.* (2022) ressaltam que a incorporação desses materiais ao biochar não apenas aumenta a eficiência de

remoção, mas também facilita a recuperação e o reuso do fósforo retido, fortalecendo a perspectiva de um ciclo fechado de nutrientes.

No caso do biochar modificado CMBC, investigado por H. Chen *et al.* (2024), a capacidade máxima de adsorção de 144,31 mg/g, obtida com tempos de contato de 2 a 6 horas, indica elevada eficiência intrínseca do material. Embora os autores não tenham detalhado a eficiência de remoção, concluíram que o CMBC apresenta forte potencial de regeneração e aptidão para uso agrícola, reforçando o papel desses materiais como fontes de fósforo de liberação lenta. Em biochars modificados com lantanídeos, a regeneração também se mostra eficiente: Zhu *et al.* (2023) observaram que o material MBC/Mg–La-3 atingiu capacidade de adsorção de 62,50 mg/g, cerca de cinco vezes menor que a reportada por Elkhilfi *et al.* (2022), mas ainda assim altamente satisfatória, além de apresentar mecanismos como atração eletrostática, complexação interna e troca de ligantes, mantendo elevado potencial de regeneração e aplicabilidade como fertilizante. Já X. Li *et al.* (2020) reportaram desempenho superior, com capacidade de 213,22 mg/g, embora com potencial de regeneração classificado como médio, indicando possíveis limitações estruturais e químicas que comprometem a estabilidade cíclica e a viabilidade de aplicação direta do fósforo recuperado. Por outro lado, Liu *et al.* (2022) demonstraram que o biochar DSBC700 apresenta notável capacidade regenerativa, mesmo com baixa concentração inicial de 1 mg/L, atingindo 51,79 mg/g e reforçando o papel do pH como fator determinante para a eficiência do processo.

O comportamento regenerativo também se destaca no estudo de Wang *et al.* (2024), no qual o gBC600-4B manteve eficiência de 74,39% e taxa de dessorção de 86,73% após cinco ciclos, além de remover quase 90% do fosfato na presença de íons competitivos. A elevada estabilidade estrutural e resistência à interferência iônica tornam esse adsorvente uma alternativa robusta para aplicações reais. Ainda nesse campo, Z. Xu *et al.* (2023) destacaram o potencial do FBC600 como fertilizante fosfatado, enquanto Huang (2022) indicou que o LHB800 é altamente promissor para recuperação de fosfato em águas residuárias. S. Li (2022) também reforça a viabilidade do La-MB, um material eficiente para tratamento de águas reais, combinando elevada adsorção e regeneração satisfatória.

Outros trabalhos ampliam a diversidade de estratégias de recuperação e reuso do fósforo. Li *et al.* (2024) observaram que o biochar ZnBC-OH possui desempenho comparável aos materiais modificados com lantanídeos, beneficiado pela formação de precipitados $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, que apresentam boa recuperabilidade e utilidade agrícola. Trabalhando como o composto LDH/PMA/BC, Huang *et al.* (2024) mantiveram a eficiência na remoção de

fósforo entre 85% e 93% da capacidade inicial ao longo de 10 ciclos, além de recuperar 95% do fósforo, demonstrando estabilidade cíclica superior e forte potencial de reuso. Adsorventes dopados, como os descritos por Antunes (2018) e Yang (2018), também apresentam desempenhos relevantes: o primeiro observou melhora na estabilidade ambiental com redução da lixiviação de metais pesados, enquanto o segundo relatou capacidades de até 111 mg/g com manutenção de mais de 60% da eficiência após cinco ciclos, evidenciando bom equilíbrio entre eficiência, regeneração e destinação final. Abordagens mais inovadoras incluem a pilha MAAC/AEM//CEM/AC de Cuong *et al.* (2024), capaz de concentrar fósforo em até 189% durante a fase de recuperação, e o Zr-RB de Hu *et al.* (2024), que apresentou bom desempenho após cinco ciclos e permitiu a produção de AlPO_4 de alta pureza. Adicionalmente, biochars de lodo, inclusive aqueles com capacidade de liberação lenta de fósforo, como no estudo citado, reforçam a possibilidade de uso agrícola direto, mesmo após múltiplos ciclos de regeneração.

Diante desse panorama, observa-se que a regeneração influencia diretamente a eficiência de remoção ao longo dos ciclos, uma vez que perdas estruturais, bloqueio parcial de sítios ativos ou dissolução de espécies metálicas podem reduzir a capacidade de adsorção. Entretanto, muitos materiais analisados apresentam forte estabilidade cíclica, mantendo desempenho satisfatório por quatro a dez ciclos. A destinação final como fertilizante se apresenta como uma das principais vantagens dos adsorventes baseados em metais como lantânio, alumínio, magnésio, ferro, manganês e zinco, além de biochars derivados de biomassa ou lodo, consolidando-se como via estratégica para aproveitar o fósforo recuperado e fechar o ciclo do nutriente. Apesar dos pontos fortes observados, como alta eficiência, boa regenerabilidade e aplicabilidade agrícola, também existem limitações claras, como a rápida saturação de determinados adsorventes, custos operacionais associados a regenerantes alcalinos ou ácidos, e a dificuldade de regeneração plena em materiais com mecanismo predominante de quimissorção irreversível. Dessa forma, a seleção do adsorvente mais adequado deve considerar simultaneamente eficiência de remoção, estabilidade estrutural, capacidade de regeneração e impacto ambiental do descarte, conforme apontado por Kumar *et al.* (2018), além de sua viabilidade como insumo agrícola para reciclagem de fósforo.

5.8 Perspectivas futuras e lacunas de pesquisa identificadas

A despeito dos avanços recentes no uso de adsorventes convencionais e alternativos para remoção de fósforo, a literatura ainda evidencia lacunas importantes entre estudos laboratoriais

e aplicações práticas, sobretudo em escalas piloto e reais. A maior parte dos trabalhos como os de Mitrogiannis *et al.* (2017), Ilham *et al.* (2024) e Luo *et al.* (2024), no contexto dos adsorventes convencionais demonstram elevadas eficiências sob condições controladas. Já em relação aos estudos com materiais alternativos, vale ressaltar as elevadas eficiências e capacidades de adsorção encontradas nos estudos de J, Li *et al.* (2020), Jia *et al.* (2020) e Huang *et al.* (2024), por exemplo. No entanto, poucos avaliam o desempenho dos materiais diante de variáveis operacionais típicas de sistemas reais, como flutuações de carga, presença de interferentes, colmatção e durabilidade estrutural. Essa limitação torna o campo ainda distante de uma transição tecnológica, especialmente quando se trata de adsorventes alternativos baseados em biochar, lodos, argilas modificadas ou LDHs, que podem ter excelente desempenho no laboratório, mas requerem validação em arranjos contínuos, reatores percoladores ou wetlands integrados.

Outro entrave recorrente é a baixa padronização metodológica entre estudos, dificultando comparações diretas de eficiência, capacidade de adsorção ou potencial de regeneração. Condições operacionais como pH, tempo de contato, concentração inicial, temperatura, velocidade de agitação e mesmo métodos de quantificação do fósforo variam amplamente entre artigos, resultando em valores que podem parecer discrepantes, mas que decorrem mais do arranjo experimental do que da natureza do adsorvente. Isso explica, por exemplo, a diferença entre altas capacidades observadas em materiais como MBAC4 (Wen *et al.*, 2021) ou LDH/PMA/BC (Huang *et al.*, 2024) frente a capacidades muito menores obtidas em biochars funcionalizados ou materiais magnéticos. Assim, a ausência de protocolos padronizados compromete a possibilidade de se aprofundar em uma avaliação tecnológica mais complexa, as quais, são essenciais para orientar decisões de engenharia, regulamentação e políticas públicas sobre reuso e recuperação de fósforo.

A regeneração de adsorventes, embora abordada em diversos estudos, como as regenerações superiores a 90% observadas para sistemas contendo lantânio, ferro ou cálcio, ainda carece de investigações de longo prazo. Muitos trabalhos apresentam apenas três a cinco ciclos de adsorção–dessorção, número insuficiente para estimar a viabilidade econômica ou a estabilidade estrutural do material em cenários reais. Além disso, poucos avaliam efeitos acumulativos, como lixiviação metálica, colmatção de poros, desagregação do material ou perda de funcionalidade dos grupos ativos ao longo dos ciclos. Essa lacuna é crítica,

especialmente para biochars modificados e LDHs, que têm sido apontados como adsorventes promissores não apenas pela eficiência, mas pelo potencial de recuperar fósforo como fertilizante, algo particularmente relevante em regiões agrícolas dependentes de insumos externos e com solos naturalmente pobres.

Por fim, podemos destacar a necessidade de integrar a adsorção a tecnologias híbridas, como wetlands construídos com biochars reativos, sistemas eletroquímicos, células a combustível microbianas (MFCs) ou unidades descentralizadas de saneamento, ampliando a eficiência e estabilidade operacional. Esse tipo de integração é especialmente pertinente no contexto brasileiro, sobretudo em regiões semiáridas, onde a escassez hídrica, a variabilidade climática e a alta concentração de sólidos e sais nos esgotos demandam soluções robustas, de baixo custo e com potencial de recuperação de nutrientes. A literatura evidencia que adsorventes derivados de resíduos locais, como lodo de esgoto, casca de ovo, resíduos agroindustriais ou biochars de biomassa, podem alinhar desempenho adequado com viabilidade econômica, reforçando a pertinência da pesquisa aplicada a municípios de pequeno e médio porte, como por exemplo, Pau dos Ferros/RN. Assim, superar essas lacunas metodológicas e operacionais é fundamental para transformar o grande conjunto de resultados promissores em soluções tecnológicas realistas, escaláveis e apropriadas para o cenário brasileiro.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adsorção consolida-se como uma tecnologia fundamental e altamente eficaz para a gestão e remoção do fósforo em águas residuárias. O campo de estudo atual demonstra uma clara transição, onde os adsorventes convencionais servem como ponto de referência, mas são superados em capacidade pelos materiais alternativos e híbridos desenvolvidos.

O sucesso desses novos adsorventes está intrinsecamente ligado à sua modificação química, geralmente pela incorporação de metais de alta afinidade. Estes elementos conferem ao material uma capacidade de retenção significativamente superior, operando através de uma sinergia de mecanismos, incluindo interações eletrostáticas, troca iônica e complexação de superfície. O desempenho ótimo do processo é sensível às condições operacionais do meio aquoso, sendo a faixa de pH um fator de controle determinante. A eficiência máxima é tipicamente observada em condições neutras ou levemente ácidas, que favorecem a interação entre as espécies de fósforo e a superfície do adsorvente.

A principal força motriz para o avanço desta tecnologia é o seu potencial sustentável. Além da alta eficiência de remoção, a maioria dos materiais promissores demonstra notável estabilidade cíclica e a viabilidade de regeneração. Este aspecto não só permite a reutilização econômica do material, mas, crucialmente, possibilita a recuperação do fósforo adsorvido para reintrodução na cadeia produtiva, fechando o ciclo do nutriente e atendendo à demanda por fertilizantes. No entanto, a plena implementação tecnológica é dificultada pela baixa padronização metodológica nas pesquisas, no quesito de regeneração do fósforo ao longo dos ciclos, assim como a eficiência na remoção, o que impede comparações diretas e avaliações tecnológicas complexas. Adicionalmente, a escassez de estudos de estabilidade e regeneração em longo prazo limita a comprovação da viabilidade econômica em escala real.

Portanto, as perspectivas futuras apontam para a necessidade de padronizar metodologias, quanto a viabilidade operacional e financeira, integrar a adsorção a sistemas híbridos de tratamento e, sobretudo, validar o desempenho dos materiais em escalas piloto e contínuas, adaptando as soluções globais às particularidades ambientais regionais

REFERÊNCIAS

- ABDOLI, Sima *et al.* A Review of the Efficiency of Phosphorus Removal and Recovery from Wastewater by Physicochemical and Biological Processes: Challenges and Opportunities. **Water**, v. 16, n. 17, 2024
- AKINNAWO, S. O. Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. Environmental challenges (Amsterdam, Netherlands), v. 12, n. 100733, p. 100733, 2023.
- ALMASRI, Dema A. *et al.* Adsorption of phosphate on iron oxide doped halloysite nanotubes. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 3232, 2019.
- ANTELO, Juan *et al.* Effects of pH and ionic strength on the adsorption of phosphate and arsenate at the goethite–water interface. **Journal of colloid and interface science**, v. 285, n. 2, p. 476-486, 2005.
- AN, Xiongfang *et al.* Sequential photocatalytic degradation of organophosphorus pesticides and recovery of orthophosphate by biochar/ α -Fe₂O₃/MgO composite: A new enhanced strategy for reducing the impacts of organophosphorus from wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 435, p. 135087, 2022.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Atlas de Saneamento: Esgotos Domésticos. Brasília: ANA, 2023.
- ANTUNES, Elsa *et al.* Isotherms, kinetics and mechanism analysis of phosphorus recovery from aqueous solution by calcium-rich biochar produced from biosolids via microwave pyrolysis. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 395–403, 2018
- ARAÚJO, L. S. *et al.* Caracterização e avaliação de fatores que determinam a remoção de microcistina-LR em carvão ativado granular produzido a partir de diferentes matérias-primas. Engenharia sanitária e ambiental, v. 23, n. 6, p. 1131–1142, 2018.
- AWUAL, Md Rabiul. Remoção eficiente de fosfato da água para controle da eutrofização usando um novo adsorvente composto. **Journal of Cleaner Production** , v. 228, p. 1311-1319, 2019.
- BALDOVI, Aldrew Alencar *et al.* Phosphorus removal in a pilot scale free water surface constructed wetland: hydraulic retention time, seasonality and standing stock evaluation. **Chemosphere**, v. 266, p. 128939, 2021.
- BISWAS, B.; Rahman, T.; Sakhakarmy, M.; Jahromi, H.; Eisa, M.; Baltrusaitis, J.; Lamba, J.; Torbert, A.; Adhikari, S. Phosphorus adsorption using chemical and metal chloride activated biochars: Isotherms, kinetics and mechanism study. **Heliyon**, v. 9, 2023.
- BOUAMRA, Fariza *et al.* Remoção de fosfato de águas residuais por adsorção em resíduos de mármore: efeito dos parâmetros do processo e modelagem cinética. **International Journal of Environmental Research** , v. 12, n. 1, p. 13-27, 2018.

BRAUN, Julia C. A. *et al.* Phosphorus adsorption in Fe-loaded activated carbon: Two-site monolayer equilibrium model and phenomenological kinetic description. **Chemical Engineering Journal**, v. 361, p. 751–763, 2019

BRESCIA *et al.* Theoretical review of the interconnectivity of hierarchical porous materials – characterization by physical adsorption. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa, v. 8, n. 1, p. 13502-01, 12, 2022.

CAO, Hongliang *et al.* Características e mecanismos de adsorção de fósforo por biochar derivado de palha de colza funcionalizado com cálcio de casca de ovo. **Bioresource Technology**, v. 318, p. 124063, 2020.

CAPUA, Francesco Di *et al.* Phosphorous removal and recovery from urban wastewater: Current practices and new directions. **Science of The Total Environment**, v. 823, p. 153750, 2022.

CUONG, Dinh Viet *et al.* Unlocking phosphorus recovery potential with layered double hydroxide-decorated activated carbon electrodes in membrane capacitive deionization. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 5, p. 113676, 2024.

CUI, Rui *et al.* Efficient removal of phosphate from aqueous media using magnetic bimetallic lanthanum-iron-modified sulfonylmethylated lignin biochar. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 247, p. 125809, 2023.

CUNHA, S. B. Recursos Hídricos no Brasil e no Mundo. 2014.

CHENG, X.; HUANG, X.; LI, K. Competitive adsorption of phosphate and nitrate onto natural iron oxide minerals: Influence of ionic strength and pH. **Chemosphere**, v. 77, n. 8, p. 1206–1211, 2009.

CHEN, Jun *et al.* Preparation of La/Mg modified sheep dung activated carbon and its adsorption characteristics for phosphorus in wastewater. **Desalination and Water Treatment**, v. 317, p. 100013, 2024a.

CHEN, Ming *et al.* Low-cost Ca/Mg co-modified biochar for effective phosphorus recovery: Adsorption mechanisms, resourceful utilization, and life cycle assessment. **Chemical Engineering Journal**, v. 502, p. 157993, 2024b.

CHUNG, Hyung-Keun *et al.* Aplicação das isotermas de Langmuir e Freundlich para prever a eficiência de remoção do adsorvato ou a quantidade necessária de adsorvente. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 28, p. 241-246, 2015.

CLARA, M. *et al.* Remoção de fármacos em ETEs: análise de rejeitos ainda presentes no efluente. **Cadernos Técnicos de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 3, n. 4, 2023.

DAHOU, Mohammed *et al.* Síntese e caracterização de cimento Portland incorporado com lodo de estação de tratamento de água potável. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 2, p. 891-901, 2018.

EDET, Uduakobong A.; IFELEBUEGU, Augustine O. Kinetics, isotherms, and thermodynamic modeling of the adsorption of phosphates from model wastewater using recycled brick waste. **Processes**, v. 8, n. 6, p. 665, 2020.

ELKHLIFI, Zouhair *et al.* Lanthanum hydroxide engineered sewage sludge biochar for efficient phosphate elimination: Mechanism interpretation using physical modelling. **Science of The Total Environment**, v. 803, p. 149888, 2022.

ELKHLIFI, Zouhair *et al.* Comparative assessment of phosphate adsorption properties and mechanisms on Mg/Al-engineered sewage sludge biochar in aqueous solution. **Journal of Water Process Engineering**, v. 56, p. 104443, 2023.

ESTEVEES, F. A. Fundamentos de Limnologia. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FRANÇA, Pedro Henrique Barcellos. Uso de biocarvão impregnado com alumínio reciclado para remoção de contaminantes ambientais. 2023. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

GUO, X. *et al.* Recovery of phosphorus from aqueous solution by iron–aluminum–zirconium-modified anthracite: Performance and mechanism. **ACS sustainable chemistry & engineering**, v. 8, n. 23, p. 8577–8584, 2020.

GUPTA, V. K.; ALI, I. Water Treatment for Inorganic Pollutants by Adsorption Technology. In: **Environmental Water: Advances in Treatment, Remediation and Recycling**. Amsterdam: Elsevier, 2012. p. 29–91.

HE, Yingchun *et al.* Nitrogen-doped activated carbon composite electrode for deionization of phosphate removal and DFT model adsorption of phosphates. **Chemosphere**, v. 364, p. 142973, 2024.

HU, Shaogang *et al.* Selective recovery of high purity aluminium phosphate from incinerated sewage sludge ash with Zr-modified biochar. **Journal of Cleaner Production**, v. 446, p. 141463, 2024.

HU, Ziwan *et al.* Adsorption of phosphorus in water by metal-modified large-size biochar: Realizing the recovery and recycling of phosphorus. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 36, p. 101279, 2023.

HUANG, Yimin *et al.* Selective adsorption behavior and mechanism of phosphate in water by different lanthanum modified biochar. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 107476, 2022.

HUANG, Yimin *et al.* Effective removal and recovery of phosphorus using ZnAl-COOH-modified biochar via hydrogen bonds. **Separation and Purification Technology**, v. 329, p. 125159, 2024.

HORDONES, Nayara Cristina de Oliveira. Avaliação da qualidade da água por meio de Índices Numéricos: um estudo de caso do córrego Brejo Alegre em Araguari (MG). 2022. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 26 set. 2022.

ILHAM, Rachmannu *et al.* Optimization of Phosphate Adsorption Using Activated Carbon Derived from Pangium edule Shell. **Journal of Renewable Materials**, v. 12, n. 11, p. 1895–1909, 2024.

JANUŠEVIČIUS, Tomas *et al.* The Removal of Phosphorus from Wastewater Using a Sewage Sludge Biochar: A Column Study. **Water**, v. 16, n. 8, 2024.

JIA, Ziyue *et al.* Adsorption removal and reuse of phosphate from wastewater using a novel adsorbent of lanthanum-modified platanus biochar. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 140, p. 221–232, 2020.

JIANG, C. *et al.* Comparison of quartz sand, anthracite, shale and biological ceramsite for adsorptive removal of phosphorus from aqueous solution. *Journal of Environmental Science*, v. 26, n. 2, p. 466–477, 2014.

JUNG, K. W. *et al.* Capacidade de adsorção de fosfato de nanocompósitos montados com biocarvão/Mg-Al preparados pelo método de modificação eletroassistida com eletrodo de alumínio e MgCl₂ como eletrólito. **Bioresource technology**, v. 198, p. 603-610, 2015.

KEYIKOGLU, R.; KHATAEE, A.; YOON, Y. Layered double hydroxides for removing and recovering phosphate: Recent advances and future directions. *Advances in colloid and interface science*, v. 300, n. 102598, p. 102598, 2022.

KONADU-AMOA, B. *et al.* Metallic iron (Fe⁰)-based materials for aqueous phosphate removal: A critical review. **Journal of environmental management**, v. 315, n. 115157, p. 115157, 2022.

KUMARI, S.; DONG, Y.; SAFFERMAN, S. I. Phosphorus adsorption and recovery from waste streams using biochar: review of mechanisms, modifications, and agricultural applications. **Applied water science**, v. 15, n. 7, 2025.

LANGMUIR, Irving. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical society**, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.

LEE, Gichang; MODARRESI, Siamak; BENJAMIN, Mark M. Efficient phosphorus removal from MBR effluent with heated aluminum oxide particles (HAOPs). **Water Research**, v. 159, p. 274–282, 2019.

LEE, J. I.; Kim, J. M.; Yoo, S. C.; Jho, E. H.; Lee, C. G.; Park, S. J. Restoring phosphorus from water to soil: Using calcined eggshells for P adsorption and subsequent application of the adsorbent as a P fertilizer. *Chemosphere*, 287, 132267, 2022.

LI, Mengxue *et al.* Adsorção de fosfato em óxidos metálicos e hidróxidos metálicos: uma revisão comparativa. **Environmental Reviews**, v. 24, n. 3, p. 319-332, 2016.

LI, J.; Wu, B.; Zhou, T.; Chai, X. Preferential removal of phosphorus using modified steel slag and cement combination for its implications in engineering applications. **Environmental Technology & Innovation**, 10, 264-274, 2018.

LI, X. *et al.* Research trends on phosphorus removal from wastewater: A review and bibliometric analysis from 2000 to 2022. **Journal of water process engineering**, v. 55, n. 104201, p. 104201, 2023.

LIU, Y. *et al.* Effects of temperature and pH on phosphorus adsorption to activated alumina from aqueous solution. **Desalination**, v. 267, n. 2–3, p. 175–181, 2011.

LI, Jing *et al.* Investigation into lanthanum-coated biochar obtained from urban dewatered sewage sludge for enhanced phosphate adsorption. **Science of The Total Environment**, v. 714, p. 136839, 2020a.

LI, Man *et al.* Screening of metal-modified biochars for practical phosphorus recovery. **Science of The Total Environment**, v. 956, p. 177342, 2024.

LI, Xiaoyun *et al.* Enhanced phosphate removal from aqueous solution using resourceable nano-CaO₂/BC composite: Behaviors and mechanisms. **Science of The Total Environment**, v. 709, p. 136123, 2020b.

LI, Xiumin; SHI, Jingxin. Simultaneous adsorption of tetracycline, ammonium and phosphate from wastewater by iron and nitrogen modified biochar: Kinetics, isotherm, thermodynamic and mechanism. **Chemosphere**, v. 293, p. 133574, 2022.

LI, Dongyang *et al.* Biochar-related studies from 1999 to 2018: a bibliometrics-based review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 3, p. 2898–2908, 1 jan. 2020.

LI, Xingyang *et al.* Research trends on phosphorus removal from wastewater: A review and bibliometric analysis from 2000 to 2022. **Journal of Water Process Engineering**, v. 55, p. 104201, 2023.

LIU, Mengjie *et al.* Recovery of phosphate from aqueous solution by dewatered dry sludge biochar and its feasibility in fertilizer use. **Science of The Total Environment**, v. 814, p. 152752, 2022.

LIU, Ying *et al.* Adsorption recovery of phosphorus in contaminated water by calcium modified biochar derived from spent coffee grounds. **Science of The Total Environment**, v. 909, p. 168426, 2024.

LUO, Qingyue *et al.* Adsorption and immobilization of phosphorus from water and sediments using a lanthanum-modified natural zeolite: Performance, mechanism and effect. **Separation and Purification Technology**, v. 329, p. 125187, 2024.

MALEKMOHAMMADI, Sima; MIRBAGHERI, Ahmad; EHTESHAMI, Majid. Comparison of silica, activated carbon, and zeolite adsorbents in the removal of ammonium, iron, COD, turbidity and phosphate pollutants, and investigating the effect of discharge on the removal of pollutants. **International Journal of Humanities and Cultural Studies**, 2016.

MEDEIROS, C. K.; RUFINO, I. A.; ARAGÃO, R. Consumo de água e crescimento urbano: análises espaciais e relações possíveis. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 16, p. e20230039, 2024.

MEZENNER, N. Y.; BENSEDRIIRA, S. Phosphorus removal from wastewater using adsorption technique. In: INAMUDDIN; BODDULA, R.; AHAMED, M. I. (Org.). Advanced materials for wastewater treatment. Beverly: **Scrivener Publishing**, 2020. p. 191–219.

MITROGIANNIS, Dimitris *et al.* Removal of phosphate from aqueous solutions by adsorption onto Ca(OH)₂ treated natural clinoptilolite. **Chemical Engineering Journal**, v. 320, p. 510–522, 2017.

MOHARAMI, S.; JALALI, M. Use of modified clays for removal of phosphorus from aqueous solutions. **Environmental monitoring and assessment**, v. 187, n. 10, p. 639, 2015.

NADAGOUDA, M. N. *et al.* Recent advances in technologies for phosphate removal and recovery: A review. *ACS environmental Au*, v. 4, n. 6, p. 271–291, 2024. OMS - Organização Mundial da Saúde. Drinking-Water Fact Sheet. 2022.

NOBAHARAN, Khaterreh *et al.* Remoção de fósforo de águas residuais: o uso potencial de biochar e os principais fatores de controle. **Water**, v. 13, n. 4, p. 517, 2021.

ONU - Organização das Nações Unidas. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2023. UNESCO, 2023.

OUYANG, Erming *et al.* Structural design of La₂(CO₃)₃ loaded magnetic biochar for selective removal of phosphorus from wastewater. **Environmental Pollution**, v. 345, p. 123510, 2024.

QING, Zhuolin *et al.* Remoção rápida e eficiente de fosfato por hidróxido duplo lamelar dopado com La/biochar de solução aquosa. **New Journal of Chemistry**, v. 48, n. 7, p. 3208–3220, 2024.

QUEVEDO, C. M. G. de. Avaliação da presença de fósforo nos esgotos sanitários e da atual contribuição dos detergentes. 2015. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

RIOS, R. G. Análise hidromorfológica e da qualidade da água dos ribeirões Espera e Araras localizados no município de Três Pontas-MG. Universidade Federal de Lavras, 2020.

SANTOS, R. *et al.* Caracterização físico-química e microbiológica de esgotos domésticos: uma revisão crítica. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 4, p. 589–601, 2019.

SCHINDLER, D. W. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science*, Washington, v. 195, n. 4275, p. 260–262, 1977

SETTE JÚNIOR, C. R. Qualidade da água e regime hidrológico em sub-bacias hidrográficas dos rios Capivari e Mortes. Universidade Federal de Lavras, 2016.

SELVAM, S. Mari *et al.* Sustainable approach of modified biochar based adsorbents towards enhanced phosphorus removal from wastewater. **Journal of Analytical and Applied**

Pyrolysis, v. 188, p. 107020, 2025.

SHAIKHIEV, IG *et al.* Resíduos do tratamento de água potável como materiais de sorção para purificação de ambientes aquosos da poluição. Parte 1. Lodo de tratamento de água contendo ferro. Uma revisão. **Polymer Science, Series D** , v. 16, n. 3, p. 589-598, 2023.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2022. Brasília: Ministério das Cidades, 2023.

SURESH KUMAR, P. Phosphate recovery from wastewater via reversible adsorption. [s.l.] **Delft University of Technology**, 2018.

Trivedi, Y.; Sharma, M.; Mishra, R. K.; Sharma, A.; Joshi, J.; Gupta, A. B.; Achintya, B.; Shah, K.; Vuppaladiyand, A. K. Biochar potential for pollutant removal during wastewater treatment: A comprehensive review of separation mechanisms, technological integration, and process analysis. **Desalination**, 118509, 2025.

USMAN, M. O. *et al.* A review of adsorption techniques for removal of phosphates from wastewater. **Water Science & Technology**, v. 86, p. 3113-3132, 2022.

VALENÇA, R. M. Estudo da adsorção de fósforo em biocarvões produzidos a partir de resíduos orgânicos e aplicação em efluente sintético de esgoto sanitário. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

VILLABONA-ORTÍZ, Á; FIGUEROA-LOPEZ, K.J.; ORTEGA-TORO, R. Kinetics and Adsorption Equilibrium in the Removal of Azo-Anionic Dyes by Modified Cellulose. **Sustainability**, v. 14, n. 6, art. 3640, 2022.

von SPERLING, M. V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2014. v. 1.

WANG, L. *et al.* Comparative analysis on adsorption properties and mechanisms of nitrate and phosphate by modified corn stalks. **RSC advances**, v. 8, n. 64, p. 36468–36476, 2018.

WANG, S. *et al.* A review of the application of iron oxides for phosphorus removal and recovery from wastewater. Critical Reviews in **Environmental Science and Technology**. v. 24, p. 405-423 2024.

WANG, X. *et al.* Cooperation of ferrous ions and hydrated ferric oxide for advanced phosphate removal over a wide pH range: Mechanism and kinetics. **Water research**, v. 249, p. 120969, 2024.

WANG, Quanfeng *et al.* A novel strategy for preparing porous Fe/Ca-loaded biochar transformed from municipal sludge towards phosphate removal. **Journal of Water Process Engineering**, v. 66, p. 106109, 2024.

WEN, Yuming *et al.* Magnetic bio-activated carbons production using different process parameters for

phosphorus removal from artificially prepared phosphorus-rich and domestic wastewater. **Chemosphere**, v. 271, p. 129561, 2021.

WEI, Zhixun *et al.* Research progress of simultaneous nitrogen and phosphorus removal adsorbents in wastewater treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 6, p. 114844, 2024.

WU, Ping *et al.* A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998–2018). **Biochar**, v. 1, n. 1, p. 23–43, 1 mar. 2019.

WU, F.; Yu, Q.; Gauvin, F.; Brouwers, H. J. H.; Liu, C. Phosphorus removal from aqueous solutions by adsorptive concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123933, 2021.

WU, J. *et al.* Phosphorus removal by laboratory-scale unvegetated vertical-flow constructed wetland systems using anthracite, steel slag and related blends as substrate. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, v. 63, n. 11, p. 2719–2724, 2011.

XU, ZhiChao *et al.* Environmentally friendly crab shell waste preparation of magnetic biochar for selective phosphate adsorption: Mechanisms and characterization. **Journal of Molecular Liquids**, v. 385, p. 122436, 2023.

YANG, Fan *et al.* Assembling biochar with various layered double hydroxides for enhancement of phosphorus recovery. **Journal of Hazardous Materials**, v. 365, p. 665–673, 2019.

YANG, Qi *et al.* Effectiveness and mechanisms of phosphate adsorption on iron-modified biochars derived from waste activated sludge. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 537–544, 2018.

YI, Yunqiang *et al.* Lanthanum/iron co-modified biochar for highly efficient adsorption of low-concentration phosphate from aqueous solution. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 2, p. 111876, 2024.

YIN, Yue *et al.* Simultaneous removal of phosphate and dissolved organic matter from wastewater by MgO-doped magnetic biochar: Binary adsorption and interaction mechanism. **Journal of Water Process Engineering**, v. 58, p. 104914, 2024.

ZHANG, Mingdong *et al.* Pyrolysis of Ca/Fe-rich antibiotic fermentation residues into biochars for efficient phosphate removal/recovery from wastewater: Turning hazardous waste to phosphorous fertilizer. **Science of The Total Environment**, v. 869, p. 161732, 2023.

ZHANG, Xiaoyu *et al.* MgO-modified biochar by modifying hydroxyl and amino groups for selective phosphate removal: Insight into phosphate selectivity adsorption mechanism through experimental and theoretical. **Science of The Total Environment**, v. 918, p. 170571, 2024.

ZHANG, Cangjie. Estudo sobre equações para quantidade adsorvida e concentração na superfície da partícula em adsorção com modelo de difusão. 2022. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, fev. 2022.

ZENG, Y. *et al.* Phosphate removal from wastewater using layered double hydroxides: A review of synthesis, performance, and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 5, 2021.

ZHOU, Y. *et al.* A review of sustainable phosphorus recovery from wastewater by adsorption and its techno-economic analysis. *Chemosphere*, v. 179, p. 157–171, 2017

ZHU, Jinqi *et al.* Magnetic biochar with Mg/La modification for highly effective phosphate adsorption and its potential application as an algacide and fertilizer. **Environmental Research**, v. 231, p. 116252, 2023.