



THAÍS CAROLINE DA CRUZ SILVA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MÍDIAS
REATIVAS CIMENTÍCIAS COM DIFERENTES
PROPORÇÕES DE ADSORVENTES PARA REMOÇÃO DE
IBUPROFENO E NAPROXENO EM SOLUÇÃO AQUOSA E
ESGOTO SANITÁRIO**

LAVRAS-MG

2026

THAÍS CAROLINE DA CRUZ SILVA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MÍDIAS REATIVAS CIMENTÍCIAS
COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE ADSORVENTES PARA REMOÇÃO DE
IBUPROFENO E NAPROXENO EM SOLUÇÃO AQUOSA E ESGOTO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Saneamento e Geotecnia Ambiental, para obtenção do título de Mestre.

Dr. Ronaldo Fia
Orientador

Dr. Jacineumo Falção de Oliveira
Coorientador

LAVRAS – MG
2026

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Thaís Caroline da Cruz.

Desenvolvimento e avaliação de mídias reativas cimentícias com diferentes proporções de adsorventes para remoção de ibuprofeno e naproxeno em solução aquosa e esgoto sanitário / Thaís Caroline da Cruz Silva. - 2026.

75 p.

Orientador: Ronaldo Fia

Coorientador: Jacineumo Falcão Oliveira

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Contaminantes emergentes. 2. Carvão ativado. 3. Tratamento terciário. 4. Compósitos cimentícios. I. Fia, Ronaldo. II. Oliveira, Jacineumo Falcão. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

THAÍS CAROLINE DA CRUZ SILVA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MÍDIAS REATIVAS
CIMENTÍCIAS COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE ADSORVENTES PARA
REMOÇÃO DE IBUPROFENO E NAPROXENO EM SOLUÇÃO AQUOSA E
ESGOTO SANITÁRIO**

**DEVELOPMENT AND EVALUATION OF CEMENT-BASED REACTIVE MEDIA
CONTAINING DIFFERENT ADSORBENT PROPORTIONS FOR IBUPROFEN AND
NAPROXEN REMOVAL FROM AQUEOUS SOLUTIONS AND SANITARY
WASTEWATER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Saneamento e Geotecnia Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31 de março de 2026.

Prof. Dr. Ronaldo Fia	UFLA
Prof. Dr. Mateus Pimentel de Matos	UFLA
Prof. Dr. Jacineumo Falcão de Oliveira	UFERSA
Prof. Dr. Fernando Neris Rodrigues	UEMG

Dr. Ronaldo Fia
Orientador

Dr. Jacineumo Falcão de Oliveira
Coorientador

LAVRAS – MG

2026

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela força e pela perseverança concedidas ao longo desta caminhada. Em todos os momentos, especialmente nos mais difíceis, encontrei amparo e motivação para seguir em frente.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação, pela oportunidade de realização deste mestrado e por toda a estrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos e apoio financeiro ao projeto (APQ-02037-22), fundamental para a execução deste trabalho e para minha formação acadêmica e profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido.

À Central de Análises e Prospecção Química da Universidade Federal de Lavras, e à Finep, Fapemig, CNPq e Capes pelo fornecimento dos equipamentos e suporte técnico para experimentos envolvendo análises cromatográficas.

Ao Laboratório de Saneamento e Sustentabilidade Ambiental e à Fapemig pelo fornecimento dos equipamentos de análises cromatográficas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ronaldo Fia, pela orientação, confiança, ensinamentos e contribuições científicas ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Sua dedicação e conhecimento foram essenciais para a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Jacineumo Falcão de Oliveira, pelas valiosas contribuições, apoio técnico e disponibilidade durante todas as etapas da pesquisa.

À minha família, especialmente ao meu pai, Rodovaldo, à minha mãe, Viviane, ao meu avô, José Maurício, à minha irmã, Raiane, à minha tia Vilma e ao meu tio José Eugênio, por todo o amor, incentivo, apoio e compreensão ao longo desta trajetória. Obrigada por acreditarem em mim, estarem ao meu lado nos momentos difíceis e celebrarem comigo cada conquista. Esta vitória também é de vocês.

Aos amigos, colegas de laboratório e professores que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa, meu sincero agradecimento.

Por fim, agradeço a todos que fizeram parte desta caminhada e contribuíram, de alguma forma, para a concretização deste sonho.

Obrigada!

Lembra quando estava por um fio pra desistir?

E quando faltou isso aqui pra você cair?

E mesmo assim você tentou mais uma vez!

Era a mão de Deus

(Arnaldo da Cruz Quaresma Junior)

RESUMO

No Brasil, os sistemas de tratamento de esgoto são projetados visando à remoção de sólidos e matéria orgânica, ou seja, geralmente são formados por reatores biológicos. Embora os reatores biológicos apresentem bons níveis de eficiência para remoção e degradação da matéria orgânica, estes não apresentam eficiência para a remoção de fármacos, substâncias presentes no grupo dos contaminantes emergentes. Dessa forma, o objetivo da pesquisa foi avaliar a remoção de fármacos em solução aquosa sintética e do esgoto sanitário da ETE da Universidade Federal de Lavras (UFLA) por meio de mídias reativas desenvolvidas com diferentes materiais. Para confecção das mídias reativas foram utilizados cimento Portland, carvão ativado e zeólitas em percentual mássico de 50% de cimento e 50% de zeólita (CCa0Z50), 50% de cimento, 25% de zeólita e 25% de carvão ativado (CCa25Z25) e 50% de cimento 50% de carvão ativado (CCa50Z0). As mídias reativas apresentaram formato de tronco de pirâmide com dimensões entre 1 e 2 cm. Diferentes concentrações de naproxeno e ibuprofeno (1 mg L^{-1} , 2 mg L^{-1} , 3 mg L^{-1} , 4 mg L^{-1} e 5 mg L^{-1}) foram submetidas ao ensaio de sorção em lote, com 80 rpm, por 40 minutos a 25°C . Os resultados, com a mídias evidenciaram remoção de ibuprofeno e naproxeno em solução aquosa entre 91 e 98% e 75 e 91%, respectivamente. As maiores eficiências foram observadas para as maiores concentrações que alcançaram em torno de $0,160 \text{ mg g}^{-1}$, no ensaio III. Para o esgoto sanitário com adição dos fármacos, foram alcançadas remoções de $0,097 \text{ mg g}^{-1}$ e $0,304 \text{ mg g}^{-1}$ para o ibuprofeno e o naproxeno no ensaio III; enquanto para o esgoto tratado, valores menores da ordem de $0,006 \text{ mg g}^{-1}$ e $0,010 \text{ mg g}^{-1}$, respectivamente, foram obtidos, com eficiência de 83 e 80%. Os resultados obtidos na presente pesquisa demonstram que as mídias reativas desenvolvidas a partir de cimento, zeólita e carvão ativado apresentam elevado potencial para a remoção de ibuprofeno e naproxeno, tanto em solução aquosa sintética quanto em efluente sanitário tratado.

Palavras-chave: contaminantes emergentes, carvão ativado, tratamento terciário, compósitos cimentícios.

ABSTRACT

In Brazil, wastewater treatment systems are primarily designed for the removal of solids and organic matter and, therefore, are generally based on biological reactors. Although biological reactors exhibit satisfactory efficiency in the removal and degradation of organic matter, they are not effective for the removal of pharmaceutical compounds, which belong to the group of emerging contaminants. Therefore, the objective of this study was to evaluate the removal of pharmaceuticals from synthetic aqueous solutions and sanitary wastewater from the wastewater treatment plant (WWTP) of the Federal University of Lavras (UFLA) using reactive media developed with different materials. The reactive media were produced using Portland cement, activated carbon, and zeolites, with mass proportions of 50% cement and 50% zeolite (CCa0Z50), 50% cement, 25% zeolite, and 25% activated carbon (CCa25Z25), and 50% activated carbon (CCa50Z0). The reactive media were manufactured in the shape of truncated pyramids with dimensions ranging from 1 to 2 cm. Different concentrations of naproxen and ibuprofen (1 mg L⁻¹, 2 mg L⁻¹, 3 mg L⁻¹, 4 mg L⁻¹, and 5 mg L⁻¹) were subjected to batch sorption assays conducted at 80 rpm for 40 minutes at 25 °C. The results obtained with the reactive media demonstrated ibuprofen and naproxen removal efficiencies in synthetic aqueous solution ranging from 91 to 98% and from 75 to 91%, respectively. The highest efficiencies were observed at the highest concentrations, reaching approximately 0.160 mg g⁻¹ in assay III. For sanitary wastewater spiked with pharmaceuticals, removal capacities of 0.097 mg g⁻¹ and 0.304 mg g⁻¹ were achieved for ibuprofen and naproxen, respectively, in assay III. In treated wastewater, lower values of approximately 0.006 mg g⁻¹ and 0.010 mg g⁻¹, respectively, were obtained, with removal efficiencies of 83% and 80%. The results obtained in this study demonstrate that the reactive media developed from cement, zeolite, and activated carbon exhibit high potential for the removal of ibuprofen and naproxen from both synthetic aqueous solutions and treated sanitary effluent.

Keywords: Emerging contaminants, activated carbon, tertiary treatment, cementitious composites.

Impactos sociais, tecnológicos, econômicos e culturais

A presente pesquisa teve como objetivo desenvolver e avaliar mídias reativas cimentícias contendo carvão ativado e zeólita para remoção dos fármacos ibuprofeno e naproxeno em solução aquosa sintética e em esgoto sanitário tratado proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Os resultados obtidos demonstraram elevado potencial tecnológico e ambiental das mídias desenvolvidas, alcançando eficiências de remoção entre 91 e 98% para ibuprofeno e entre 75 e 91% para naproxeno em solução aquosa, além de remoções superiores a 80% em efluente sanitário tratado. Os impactos potenciais da pesquisa estão diretamente relacionados à mitigação da contaminação de corpos hídricos por contaminantes emergentes, contribuindo para a preservação da qualidade ambiental e redução dos riscos ecotoxicológicos associados à presença de fármacos em ambientes aquáticos. Considerando que os sistemas convencionais de tratamento de esgoto no Brasil não são projetados para remoção desses compostos, o desenvolvimento de tecnologias complementares de baixo custo e elevada eficiência apresenta relevante impacto tecnológico e ambiental, especialmente para municípios e instituições que utilizam sistemas biológicos convencionais de tratamento. A utilização de materiais amplamente disponíveis, como cimento Portland, carvão ativado e zeólita, favorece a viabilidade técnica e econômica da aplicação em escala real, ampliando o potencial de implementação em estações de tratamento de esgoto e sistemas descentralizados. O trabalho também apresenta impacto científico e acadêmico, contribuindo para o avanço das pesquisas relacionadas aos contaminantes emergentes e aos processos de adsorção aplicados ao saneamento ambiental. A pesquisa está inserida principalmente nas áreas temáticas de meio ambiente, saúde e tecnologia, uma vez que os resultados possuem potencial de aplicação voltado à proteção dos recursos hídricos e da saúde pública, contribuindo para o desenvolvimento de soluções sustentáveis voltadas ao tratamento de águas residuárias e à redução da poluição hídrica.

Social, technological, economic and cultural impacts

The present study aimed to develop and evaluate cementitious reactive media containing activated carbon and zeolite for the removal of the pharmaceuticals ibuprofen and naproxen from synthetic aqueous solutions and treated sanitary wastewater from the Wastewater Treatment Plant of the Federal University of Lavras (UFLA). The obtained results demonstrated the high technological and environmental potential of the developed media, achieving removal efficiencies ranging from 91 to 98% for ibuprofen and from 75 to 91% for naproxen in aqueous solution, in addition to removal efficiencies above 80% in treated sanitary effluent. The potential impacts of this research are directly associated with the mitigation of water contamination by emerging contaminants, contributing to the preservation of environmental quality and to the reduction of ecotoxicological risks associated with the presence of pharmaceuticals in aquatic environments. Considering that conventional wastewater treatment systems in Brazil are not designed for the removal of these compounds, the development of complementary low-cost and high-efficiency technologies represents a significant technological and environmental contribution, especially for municipalities and institutions that operate conventional biological treatment systems. The use of widely available materials, such as Portland cement, activated carbon, and zeolite, enhances the technical and economic feasibility of large-scale application, increasing the potential for implementation in wastewater treatment plants and decentralized treatment systems. The study also presents scientific and academic relevance by contributing to the advancement of research related to emerging contaminants and adsorption processes applied to environmental sanitation. Furthermore, the research is mainly associated with the thematic areas of environment, health, and technology, since the obtained results present potential applications aimed at protecting water resources and public health, contributing to the development of sustainable solutions for wastewater treatment and the reduction of water pollution.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS.....	11
3.	REVISÃO DE LITERATURA	12
3.1	Poluição Hídrica	12
3.2	Tratamento de esgoto no Brasil.....	13
3.3	Contaminantes emergentes – CEs	14
3.4	Fármacos	15
3.5	Principais vias de entrada dos fármacos em corpos hídricos	18
3.6	Remoção de fármacos	22
3.7	Adsorção de ibuprofeno e naproxeno por carvão ativado e zeólitas.....	26
3.7.1	Adsorção em carvão ativado	26
3.7.2	Adsorção em zeólitas	27
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
	SEGUNDA PARTE	39
	Artigo 1 - Elaborado conforme a norma NBR 6022	39
	DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MÍDIAS REATIVAS CIMENTÍCIAS COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE ADSORVENTES PARA REMOÇÃO DE IBUPROFENO E NAPROXENO EM SOLUÇÃO AQUOSA E ESGOTO SANITÁRIO	39
1.	INTRODUÇÃO	42
2.	MATERIAL E MÉTODOS	44
2.1	Confecção das mídias reativas	44
2.2	Ensaio de adsorção dos fármacos em solução aquosa	46
2.3	Ensaio de adsorção em esgoto sanitário fortificado com fármaco	49
2.4	Análise dos resultados	50
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
3.1	Eficiência de adsorção do ibuprofeno e naproxeno em solução aquosa	51
3.2	Eficiência de adsorção do ibuprofeno e naproxeno do esgoto sanitário	59
4.	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1. INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico e o aumento das atividades que requerem o uso e exploração dos recursos hídricos, resultam na geração de grandes quantidades de águas residuárias com elevadas cargas de matéria orgânica, nutrientes (fósforo e nitrogênio) e contaminantes emergentes. A falta de infraestrutura adequada colabora para a disposição inadequada das águas residuárias provenientes dessas atividades em corpos hídricos, o que influencia nas características do corpo receptor, alterando as variáveis físico-químicas e biológicas de qualidade da água.

O lançamento contínuo de efluentes com a presença de matéria orgânica e nutrientes, tem o potencial de provocar desequilíbrios no sistema aquático, devido ao crescimento excessivo de algas sendo capaz de ocasionar a eutrofização. Ademais a presença de contaminantes emergentes, podem causar prejuízos ao meio ambiente e à saúde pública. Dentre os compostos considerados como os contaminantes emergentes, estão os fármacos como antibióticos, analgésicos, anti-inflamatórios e contraceptivos orais.

No Brasil, os sistemas convencionais presentes nas estações de tratamento de esgoto (ETE) são projetados visando principalmente a remoção da matéria orgânica e, atualmente, com o avanço das normas ambientais tem sido ampliado os mecanismos de remoção de nitrogênio. Entretanto, substâncias como os compostos emergentes não apresentam unidades projetadas para a sua remoção, sendo removidos parcialmente e persistem no meio hídrico. A Comissão Europeia, tem proposto que as grandes ETEs implementem um tratamento quaternário para remover esses compostos emergentes críticos como os fármacos antes de serem liberados no ambiente (Mahdavi; Siol; Thöming, 2025).

A presença de fármacos em cursos d'água são provenientes dos medicamentos, ingeridos pela população para o tratamento de doenças, que posteriormente são excretados pelo organismo sem sofrer alteração química ou serem parcialmente metabolizados, e podem ainda ser metabólitos ativos e quando introduzidos em cursos d'água pelo lançamento de efluente sanitário resulta na contaminação do ambiente alcançando animais e o homem (Liu *et al.*, 2023).

Diante do exposto, nota-se que a presença de fármacos em ambientes aquáticos pode ser considerada um problema ambiental, em função da ausência de tecnologias que propiciem a remoção satisfatória dessas substâncias em efluentes sanitários humanos ou de animais. Assim, o estudo e avaliação de tecnologias que proporcionem o monitoramento e a remoção de fármacos em ETEs se torna imprescindível. Ferrer-Polonio *et al.*, (2020) verificaram que as

remoções de três fármacos (paracetamol, cafeína e ibuprofeno) por hidrólise, oxidação e volatilização durante o tratamento biológico com sistema de lodo ativado foram negligenciáveis. Outros resultados mostraram que o sistema híbrido lodo ativado seguido de carvão ativado produziu um efluente livre dos fármacos estudados.

Uma etapa adicional de adsorção como etapa final de tratamento de águas residuárias em ETEs poderia oferecer uma solução potencial. Diferentes tipos de adsorventes têm sido examinados na literatura quanto à sua capacidade de adsorver produtos farmacêuticos dissolvidos, incluindo carvões ativados, biochar, argilas, sílica, zeólitas e polímeros (Mahdavi; Siol; Thöming, 2025), que podem ser inseridos como etapa complementar ao tratamento. Algumas unidades de tratamento de águas residuárias apresentam material suporte, como os filtros biológicos e os wetlands construídos, e diferentes materiais têm sido estudados para remoção de fármacos (Hernández-Cardona *et al.*, 2025), mas há dificuldades operacionais quando utilizados de forma isolada, devido à granulometria e suas possíveis implicações na unidade de tratamento, como a colmatção. Assim, o desenvolvimento de mídias reativas com maior granulometria a partir desses adsorventes é uma alternativa para serem inseridas nestes sistemas para a remoção de fármacos juntamente com os demais poluentes, sem a necessidade de uma unidade posterior de tratamento.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a remoção de fármacos em meio aquoso e no esgoto sanitário tratado na ETE da Universidade Federal de Lavras (UFLA) por meio de mídias reativas desenvolvidas com diferentes materiais.

Os objetivos específicos foram:

- Desenvolver mídias reativas a partir de cimento Portland, zeólita e carvão ativado;
- Avaliar a capacidade adsorptiva de fármacos pelas mídias reativas em solução aquosa sintética;
- Determinar a presença dos fármacos ibuprofeno e naproxeno no esgoto sanitário tratado da ETE-UFLA;
- Avaliar a capacidade adsorptiva de fármacos pelas mídias reativas em esgoto tratado;
- Avaliar a eficiência das mídias na remoção de fármacos em matriz real de esgoto sanitário fortificado.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Poluição Hídrica

As atividades antropogênicas e a expansão de grandes centros urbanos, tem contribuído para o aumento da contaminação de corpos hídricos devido à disposição de águas residuárias com a presença de poluentes e micropoluentes, substâncias que afetam o ecossistema, a saúde e a qualidade de vida (Lima *et al.*, 2017).

Os ecossistemas aquáticos se comportam como purificadores e dispersores de poluentes antropogênicos. O lançamento contínuo de grandes quantidades de águas residuárias podem influenciar a capacidade autodepurativa do corpo receptor (Quadra *et al.*, 2017). Segundo De Moraes, Vian e Coelho (2023) a intensidade da contaminação das águas pode ser proporcional à redução da autodepuração, resultando em níveis acima da capacidade de assimilação do corpo d'água.

No esgoto estão presentes várias substâncias químicas como matéria orgânica, nutrientes, organismos patogênicos e um grupo de compostos denominados contaminantes emergentes – CE que contribuem para o aumento da contaminação de corpos hídricos (Von Sperling, 2014; Branco *et al.*, 2021).

O aumento da carga de matéria orgânica em um corpo hídrico está associado ao aumento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e consequentemente à diminuição do oxigênio dissolvido (OD) consumido pelos microrganismos durante os processos metabólicos, pois após o lançamento de efluente no curso d'água, as bactérias utilizam o OD no processo de estabilização da matéria orgânica (Pinheiro; Ribeiro, 2019).

Os nutrientes estão relacionados à presença de fósforo (P) e de nitrogênio (N) que, quando dispostos em excesso nos cursos d'água, têm a capacidade de causar o fenômeno da eutrofização. A eutrofização pode ser descrita como um processo natural, mas é acelerada em decorrência da liberação de efluente não tratado proveniente de atividades agrícolas, domésticas e industriais, que, associado a outras condições propícias do meio aquático, leva ao crescimento excessivo de algas que, ao florescerem, liberam cianotoxinas nas águas e quando sofrem decomposição reduz o oxigênio dissolvido da água, levando à morte de animais aquáticos, e perda do ecossistema (Tiwari; Pal, 2022).

A presença de organismos patogênicos pode ser evidenciada pela quantificação dos coliformes termotolerantes ou pela presença de *Escherichia coli*, bactérias que, normalmente, são encontradas no intestino dos seres humanos e animais homeotérmicos. A presença de

patógenos causa doenças transmitidas por alimentos e água, o que pode ocasionar diarreia e outras doenças mais graves (Xu *et al.*, 2022).

Ainda, dentre as substâncias presentes no esgoto, encontram-se os contaminantes emergentes (CE). Substâncias com elevado potencial de toxicidade e difíceis de serem biodegradadas com efeitos bacteriostáticos, o que dificulta que as tecnologias convencionais de tratamento de água consigam uma remoção eficiente (Borges *et al.*, 2016; Xing *et al.*, 2023).

3.2 Tratamento de esgoto no Brasil

No Brasil, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), aproximadamente 62,3% da população possui acesso à coleta de esgoto e cerca de 51,8% do esgoto gerado recebe tratamento adequado. Dentre os sistemas de tratamento utilizados no país, destacam-se os processos biológicos, especialmente os reatores anaeróbios, amplamente empregados devido ao baixo custo operacional e à adaptação às condições climáticas brasileiras (BRASIL, 2024). Os sistemas convencionais de tratamento de esgoto consistem no direcionamento de todo o esgoto coletado para a estação de tratamento de esgoto (ETE), que poderá englobar até quatro níveis de tratamento: preliminar, primário, secundário e terciário (Tonetti *et al.*, 2018).

Em um estudo referente aos processos de tratamento de esgoto sanitário nas regiões sul, sudeste e centro-oeste, Chernicharo (2017) notou que as tecnologias de tratamento de esgoto mais empregadas nessas regiões eram baseadas na utilização de reatores UASB, lagoas de estabilização e lodos ativados. Em uma análise sobre o desempenho de estações de tratamento de esgoto localizadas em Minas Gerais, Oliveira e Von Sperling (2007) observaram que as formas de tratamento mais usadas na região eram os sistemas convencionais de tratamento de esgoto, sendo estes: fossa séptica seguida de filtro anaeróbio, lagoas facultativas, lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, lodos ativados, reatores UASB operando isoladamente e reatores UASB seguidos por pós-tratamento. Apesar de os estudos não serem tão recentes, acredita-se que muito pouco tenha mudado, tendo em vista os pequenos índices de avanço no saneamento brasileiro.

Os sistemas convencionais de tratamento de esgoto são projetados visando o tratamento biológico, para que sejam alcançados bons níveis de remoção de matéria orgânica, sólidos e microrganismos. Porém, substâncias como nutrientes e CEs não são removidas nestes sistemas (Oliveira *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, os CEs têm ganhado certa atenção devido aos possíveis danos que podem causar à saúde dos seres humanos e outros seres vivos. Nesse sentido, a regulamentação

e legislação vigentes para o enquadramento dos níveis de disposição dessas substâncias se tornam imprescindíveis, porém ainda não ocorrem no Brasil. Em um estudo sobre a ocorrência dos CEs em águas residuárias, Parida *et al.* (2021) citaram que agências ambientais da União Europeia (UE), e dos Estados Unidos (USEPA), além da Organização Mundial da Saúde (OMS) e alguns outros órgãos reguladores internacionais desenvolveram uma lista de poluentes prioritários, que inclui contaminantes que representam uma grande ameaça à biota aquática e à saúde humana.

No Brasil, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA nº 430 de 2011 que dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água, estabelece limites de lançamento para algumas variáveis químicas, físicas e biológicas (Brasil, 2011). As estações de tratamento de esgoto convencionais no Brasil foram historicamente projetadas com foco na remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica e microrganismos patogênicos, priorizando parâmetros clássicos de qualidade, como DBO, DQO, SST e nutrientes. Nesse contexto, os contaminantes emergentes, como os fármacos, não eram considerados nos projetos originais desses sistemas, principalmente devido às limitações analíticas existentes à época e ao reduzido conhecimento sobre seus efeitos ambientais e toxicológicos. Dessa forma, muitos sistemas convencionais apresentam baixa eficiência na remoção desses compostos. Embora a Resolução CONAMA nº 430/2011 não estabeleça padrões específicos de lançamento para contaminantes emergentes, observa-se um avanço regulatório relacionado à segurança da água para abastecimento humano, especialmente com a publicação da Portaria GM/MS nº 888/2021, que instituiu o Plano de Segurança da Água (PSA). Essa abordagem prevê a avaliação de riscos locais associados aos mananciais de abastecimento, incluindo a possibilidade de monitoramento de fármacos e desreguladores endócrinos em situações de potencial risco à saúde pública (Moya-Llamas; Pacazocchi; Trapote, 2023).

3.3 Contaminantes emergentes – CEs

Segundo Nguyen *et al.* (2021), as descargas de efluentes têm sido consideradas uma das principais fontes de produtos químicos sintéticos que entram no ambiente aquático. A disposição constante dos CEs em corpos d'água causa efeitos crônicos genotóxicos, mutagênicos e ecotoxicológicos em plantas, animais aquáticos e humanos, por não se degradarem facilmente e persistirem por longos períodos no meio ambiente devido à estrutura estável (Samal; Mahapatra; Ali, 2022)

Os CEs são compostos que nos últimos anos vêm amplamente sendo estudados devido aos seus potenciais efeitos na saúde e na natureza, pela difícil degradação por meio de técnicas

convencionais. Além disso, são substâncias de origem sintética ou natural, que na maioria das vezes são oriundas das atividades humanas, agrícolas e pecuárias, e estão presentes nos efluentes domésticos, industriais, hospitalares e são encontradas no solo, na água e no ar (Montagner; Vidal; Acayaba, 2017; Samal; Mahapatra, 2022).

Para Crini *et al.* (2022) e Branco *et al.* (2021), nos CEs estão incluídos os antibióticos, hormônios, drogas ilícitas, fármacos, plastificantes, cosméticos, produtos de higiene pessoal, pesticidas, surfactantes, produtos industriais, microplásticos, nanopartículas e nanomateriais, os seus respectivos subprodutos. E algumas destas podem atuar como desreguladores endócrinos.

Quando presentes no meio ambiente, os CEs são encontrados em concentrações traço (ng L^{-1} ou $\mu\text{g L}^{-1}$), por isso, são denominados microcontaminantes que são comparativamente menores que outros poluentes presentes na água e nas águas residuárias (Lima *et al.*, 2017; Samal; Mahapatra, 2022).

Bolong *et al.* (2009) acreditam que a presença de CEs, em ambientes aquáticos, seja motivo de preocupação contínua relacionada à saúde e à segurança daqueles que consomem águas com essas substâncias, devido aos possíveis problemas que podem causar à saúde humana. Pois, ainda que se apresentem em pequenas concentrações, são deletérias para os seres humanos e para o ecossistema devido à elevada estabilidade em água, o que pode levar à bioacumulação e causar prejuízos ao ambiente e à saúde pública por exposição crônica (Falda; Assunção; Kuroda, 2023).

Geralmente, os CEs constituem resíduos nocivos provenientes das atividades humanas. São excretados ou descartados, alcançando os sistemas de tratamento de esgoto, e pouco removidos pelas unidades de tratamento. Os resíduos de medicamentos, mais conhecidos como fármacos, ao serem lançados em águas superficiais junto com o efluente dos sistemas de tratamento de esgoto, durante o processo de escoamento, difusão e infiltração, podem alcançar as águas subterrâneas e as águas superficiais (Saidulu *et al.*, 2021; Chen; Lin; Zhuang, 2022).

3.4 Fármacos

Com base nas informações do anuário sobre a indústria farmacêutica no Brasil, o país gerou um faturamento de R\$ 131,12 bilhões em 2022. O relatório destaca que 4.478 produtos farmacêuticos foram comercializados. Com base nas informações disponibilizadas no ano de 2022 referentes ao ano de 2021, houve um aumento de 5,8% de medicamentos comercializados.

Embora os produtos farmacêuticos sejam responsáveis pela melhora da qualidade de vida, por proporcionar o tratamento de doenças crônicas e relacionadas ao envelhecimento, o

aumento do consumo motivado pelo crescimento da demanda por medicamentos tem impactado o meio ambiente, devido à gestão inadequada, descarga de fármacos e seus metabólitos, tratamento e disposição (González; López; Cabral, 2021).

De acordo com Ríos *et al.* (2022) e Gaffney *et al.* (2016), os fármacos, principal grupo dos CEs, têm recebido atenção especial, pois, ao contrário de muitos poluentes, esses contaminantes podem ter uma ação específica no corpo humano por atuarem em concentrações muito baixas. A presença dessas substâncias pode causar efeitos toxicológicos no organismo humano, como insuficiência renal, problemas neurológicos, hepáticos e alterações cardiovasculares.

Diferentemente de alguns contaminantes, os fármacos foram desenvolvidos para terem uma ação específica no corpo humano e atuarem em baixas concentrações, como antibióticos, anti-inflamatórios, produtos de cuidados pessoais anticonvulsivantes, meios de contraste de raios X e antimicrobianos (Chaves; Barbosa; Primel, 2021). Assim, a exposição do ambiente a essas substâncias pode acarretar efeitos adversos ao ecossistema (Gaffney *et al.*, 2016).

O grupo dos fármacos é constituído por substâncias químicas biologicamente ativas sintetizadas, utilizadas para fins terapêuticos na medicina humana, veterinária e aquicultura que têm como intuito produzir respostas fisiológicas em humanos, animais e plantas. Embora sejam encontradas em baixas concentrações no meio, essas substâncias possuem pouca biodegradabilidade, fator que contribui para a persistência desses contaminantes e maior impacto aos organismos aquáticos (Lima *et al.*, 2017).

Com o intuito de avaliar a problemática ambiental da contaminação dos recursos hídricos por fármacos, Escher *et al.* (2019) observaram que o potencial problema ambiental da presença de fármacos em corpos hídricos envolve grandes desafios. Além de acarretar efeitos adversos à saúde humana, os fármacos podem impactar a biota aquática por meio da feminização de peixes e da diminuição da diversidade de espécies.

Segundo Escher *et al.* (2019), a presença de fármacos no ambiente foi relatada pela primeira vez por Garrison *et al.* (1976), que identificaram o ácido clofibrico em efluente tratado nos Estados Unidos. Além disso, Escher *et al.* (2019) afirmam que estudos recentes já apontam a presença dessas substâncias em matrizes aquáticas superficiais e subterrâneas. No Quadro 1 estão apresentados diferentes tipos de fármacos encontrados em águas superficiais e em ETE por diferentes autores.

Quadro 1: Tipos de fármacos encontrados em águas superficiais e em ETE por diferentes autores.

Tipos de fármaco	Ambiente/Localidade	Referência
Naproxeno e Diclofenaco	Rio de Janeiro/RJ	Stump <i>et al.</i> (1999)
Ibuprofeno e Diclofenaco	Rio Atibaiba/SP	Montagner e Jardim (2011)
Ibuprofeno e Diclofenaco	Esgoto Bruto/ETE/MS	Américo <i>et al.</i> (2012)
Naproxeno	Rio Doce/MG	Rodrigues <i>et al.</i> (2014)
Diclofenaco e Ibuprofeno	Salvador/BA	Beretta <i>et al.</i> (2014)
Paracetamol	Água Superficial/SP	Campanha <i>et al.</i> (2015a)
Paracetamol, Naproxeno e Ibuprofeno	Rio Monjolinho/SP	Campanha <i>et al.</i> (2015b)
Diclofenaco e Paracetamol	Água Superficial/ PR	Kramer <i>et al.</i> (2015)
Diclofenaco, Paracetamol e Ibuprofeno	Água Superficial/SP	Stelato <i>et al.</i> (2016)
Ibuprofeno	Baía de Santos/ RJ	Pereira <i>et al.</i> (2016)
Diclofenaco e Naproxeno	Água Superficial/MS	Lima <i>et al.</i> (2017)
Paracetamol e Ibuprofeno	Rio Monjolinho, SP	Starling, Amorim e Leão (2019)
Diclofenaco	Rio Dilúvio, Porto Alegre/RS	Arsand <i>et al.</i> (2020)
Diclofenaco	Guarujá/SP	Roveri <i>et al.</i> (2020)
Ibuprofeno, Paracetamol e Naproxeno	Belo Horizonte	Alves <i>et al.</i> (2022)
Paracetamol	Porto Alegre/RS	Bisognin <i>et al.</i> (2021)
Naproxeno e Ibuprofeno	Ipojuca, Petrolândia, Santa Maria da Boa Vista, Orocó/PE	Nascimento <i>et al.</i> (2023)
Naproxeno e Ibuprofeno	Rio Ipojuca/PE	Santos (2023)

Fonte: Da autora (2026).

3.5 Principais vias de entrada dos fármacos em corpos hídricos

Segundo Gaffney *et al.* (2016), nos últimos anos os fármacos têm recebido uma atenção especial, pois, ao contrário de muitos poluentes, esses contaminantes podem ter uma ação específica no corpo humano por atuarem em concentrações muito baixas.

Os principais constituintes dos resíduos farmacêuticos são antibióticos, quimioterápicos, hormônios, analgésicos, antibióticos, antitérmicos e antidepressivos. Após o consumo, parte desses compostos não são assimilados e metabolizados pelo corpo humano sendo excretada pelas fezes e urina chegando até as estações de tratamento de esgoto (Tiwari *et al.*, 2017).

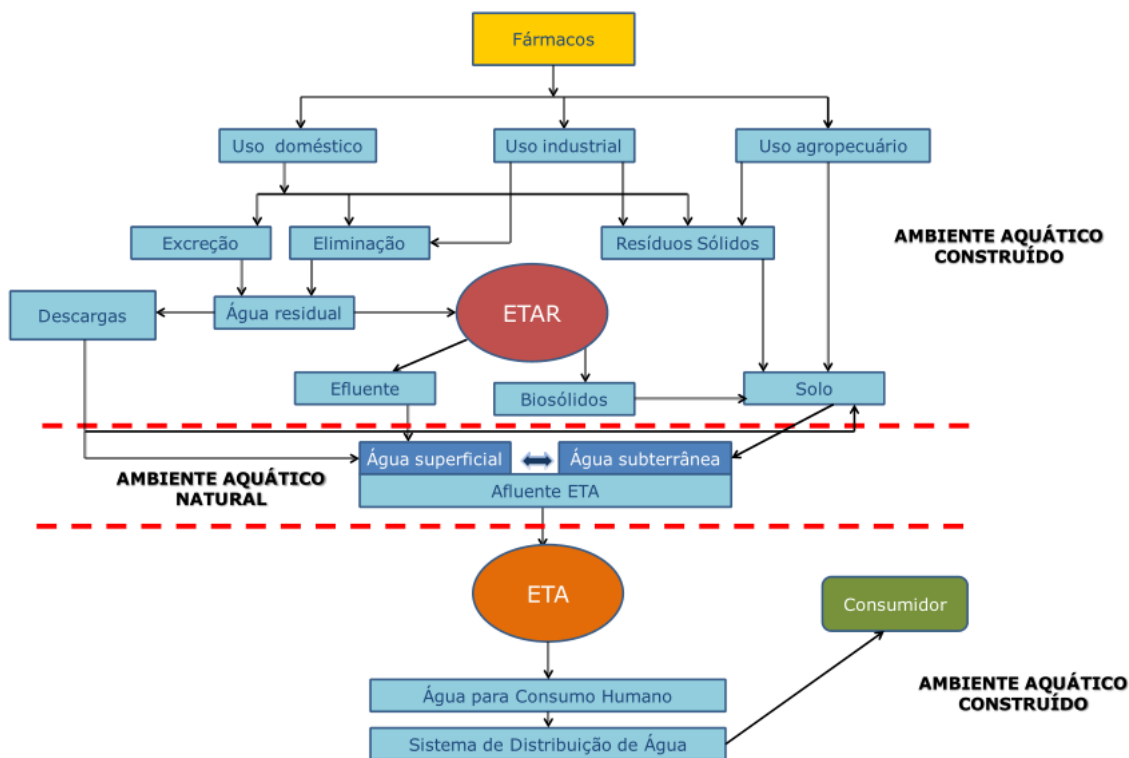
Para Rizzo *et al.* (2023) as águas residuárias urbanas contêm resíduos de fármacos, e se diferem apenas no tipo, quantidade e abundância relativa dos diferentes fármacos. A principal via de entrada desses compostos no ambiente aquático é por meio do lançamento de esgoto domésticos, bruto ou tratado em cursos d'água, bem como a disposição de efluentes de indústrias farmacêuticas, resíduos rurais e descarte inadequado de produtos farmacêuticos não utilizados (Queiroz *et al.*, 2014).

Embora sejam encontrados em pequenas concentrações, a exposição crônica a alguns fármacos encontrados no ambiente pode ocasionar efeitos adversos na saúde humana, como lesão celular, desregulação endócrina, infertilidade, alteração comportamental, resistência aos antibióticos e alteração da pressão arterial, entre outros (Gaffney *et al.*, 2016).

Dentre os diferentes tipos de fármacos presentes no meio ambiente, existem os AINEs – anti-inflamatórios não esteroidais (AINEs) e os analgésicos, duas classes de fármacos que, segundo Silva, Soares e Fajardo (2023), são os mais prescritos e adquiridos sem receita médica. Os medicamentos diclofenaco, ibuprofeno, paracetamol e naproxeno fazem parte dos AINEs, de acordo com Parolini (2020), devido às características físico-químicas e quando expostos em água doce podem causar efeito a diversos organismos e invertebrados aquáticos. Além disso, por meio dos estudos realizados, o autor evidencia que os AINEs são uma das principais tipologias de produtos farmacêuticos encontrados no meio ambiente.

O ibuprofeno e o naproxeno são anti-inflamatórios amplamente utilizados pela população para o tratamento de doenças como medicamentos que são vendidos sem prescrição médica, o que facilita o consumo da população. As principais fontes dessas substâncias são provenientes de excreções humanas como fezes e urina. No entanto, a entrada de fármacos no meio ambiente não se limita apenas ao consumo da população, mas também ao uso de substâncias provenientes da agropecuária e efluentes industriais (Kolecka; Gajewska; Caban, 2022; Liu *et al.*, 2023) (Figura 1).

Figura 1: Vias de entrada de fármacos em ambientes aquáticos.



Fonte: Gaffney *et al.* (2016).

3.5.1 Naproxeno

O naproxeno é um anti-inflamatório não esteroidal amplamente utilizado no tratamento de dores, processos inflamatórios e condições reumáticas. Não há necessidade de prescrição médica para aquisição, e por ser de fácil acesso, há uma elevada taxa de consumo global do medicamento. Ao ser consumido, parte do medicamento é metabolizada pelo corpo humano, a outra parte é excretada sob formas inalteradas ou metabolizadas, resultando em uma presença crescente desse fármaco nos efluentes domésticos, em águas superficiais e subterrâneas. Estudos recentes mostram que, devido à estabilidade molecular e alta solubilidade, o naproxeno apresenta comportamento persistente no ambiente aquático e baixa eficiência de remoção em tratamentos convencionais de esgoto (Silva *et al.*, 2023).

As vias de entrada do naproxeno no meio ambiente incluem o descarte inadequado de medicamentos vencidos, efluentes hospitalares, lançamento de esgotos domésticos sem tratamento adequado, além de descargas difusas decorrentes de uso veterinário e atividades agropecuárias. Pesquisas realizadas entre 2020 e 2025 apontam que o naproxeno é um dos anti-inflamatórios mais detectados em estações de tratamento de esgoto, com concentrações

variando entre ng L^{-1} e $\mu\text{g L}^{-1}$, especialmente em regiões com baixa cobertura de saneamento (García-Galán *et al.*, 2021).

Quando presente no ambiente aquático, o naproxeno pode sofrer processos de transformação como fotólise, fotocatalise, biodegradação e fotodegradação. Com a ausência de metodologias que removam essa substância de maneira efetiva ao ser exposta à radiação solar e a presença de espécies reativas, como radicais hidroxila, a molécula de naproxeno pode sofrer alterações estruturais capazes de originar subprodutos hidroxilados, quinonas e compostos resultantes da abertura do anel aromático. Embora este processo reduza parcialmente a concentração do fármaco, os fotoprodutos podem apresentar toxicidade superior à da molécula original, afetando organismos aquáticos como algas, peixes e anfíbios (Molez *et al.*, 2024; Fonseca *et al.*, 2021).

Nesse sentido, os impactos ecotoxicológicos associados ao naproxeno incluem alterações comportamentais em organismos aquáticos como a redução da capacidade reprodutiva, estresse oxidativo, alteração de parâmetros bioquímicos, danos hepáticos e distúrbios hormonais. Ensaios conduzidos em peixes entre 2021 e 2024 identificaram respostas adversas significativas relacionadas ao acúmulo do fármaco e de seus subprodutos, indicaram o potencial risco crônico mesmo em baixas concentrações ambientais (Zhang *et al.*, 2023).

Ao entrar em contato com o corpo humano, a ingestão crônica de concentrações residuais de naproxeno pode acarretar estresse oxidativo, processos inflamatórios e disfunções celulares, devido à elevada reatividade biológica do fármaco. O aumento da toxicidade dos subprodutos formados após a fotodegradação pode causar risco de efeitos sistêmicos, incluindo danos hepáticos, alteração de enzimas antioxidantes e perturbações hormonais. Além da inflamação crônica, disfunções gastrointestinais e potenciais efeitos renais, considerando que esses compostos atuam na inibição da ciclo-oxigenase, mecanismo que, mesmo em baixas doses, pode induzir efeitos fisiológicos adversos ao longo do tempo (Pan *et al.*, 2023; Guerra *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024).

3.5.2 Ibuprofeno

O ibuprofeno é um anti-inflamatório não esteroide (AINE) amplamente utilizado pela população devido às propriedades analgésicas, antipiréticas e anti-inflamatórias. Em função de seu uso extensivo, disponibilidade sem prescrição médica e elevado consumo populacional, esse fármaco tem sido frequentemente detectado em esgotos sanitários, efluentes tratados e corpos hídricos superficiais, podendo ser classificado como um contaminante emergente de relevância ambiental (Aguñaga *et al.*, 2024; Kümmerer, 2020).

Ao ser ingerido, pelo organismo humano uma parte dessa substância é metabolizada enquanto a outra parte é excretada pelo organismo humano, a principal via de introdução do ibuprofeno no meio ambiente ocorre por meio da excreção humana, uma vez que apenas uma fração limitada do fármaco administrado é metabolizada completamente no organismo, parte do ibuprofeno é excretada na forma inalterada ou como metabólitos ainda biologicamente ativos, sendo posteriormente transportada para os sistemas de coleta e tratamento de esgotos (Verbeeck; Blackburn; Loewen, 1983). Como os sistemas convencionais de tratamento de esgoto são projetados prioritariamente para a remoção de matéria orgânica, a remoção de fármacos como o ibuprofeno é frequentemente incompleta, favorecendo sua liberação em ambientes aquáticos naturais (Aus *et al.*, 2016; Kümmerer, 2020).

Além do lançamento de efluentes domésticos tratados, o ibuprofeno também pode alcançar o meio ambiente por meio do descarte inadequado de medicamentos vencidos ou não utilizados, efluentes hospitalares e contribuições difusas associadas a áreas urbanas (He *et al.*, 2022). Ao entrar em contato com matrizes aquosas, o ibuprofeno apresenta comportamento influenciado por suas propriedades físico-químicas e caráter moderadamente hidrofóbico. Geralmente, o composto encontra-se em meio aquoso predominantemente na forma ionizada, o que pode reduzir sua afinidade por sedimentos, mas não impede sua persistência (Buser *et al.*, 2019; Kümmerer, 2020).

Em águas superficiais e efluentes tratados as concentrações podem atingir valores da ordem de $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, especialmente em regiões com alta densidade populacional e baixa eficiência de tratamento terciário (He *et al.*, 2022), o que reforça a importância de estratégias adicionais de remoção, como processos de adsorção e tecnologias baseadas em materiais reativos.

Além disso, em ambientes aquáticos ibuprofeno pode sofrer processos de transformação, como a fotólise induzida pela radiação solar. Estudos indicam que o fármaco pode ser degradado por fotólise direta sob radiação UV-Vis, seguindo, em muitos casos, uma cinética de pseudo-primeira ordem (Olak-Kucharczyk *et al.*, 2022). No entanto, a taxa de fotodegradação natural é geralmente considerada lenta, o que limita a eficiência desse mecanismo como via principal de remoção em corpos hídricos naturais.

A fotólise pode ocorrer de forma indireta, mediada pela presença de oxigênio, como radicais hidroxila, cuja formação depende da presença de matéria orgânica dissolvida e das condições físico-químicas do meio (Pesik *et al.*, 2023). A degradação fotoquímica pode resultar na formação de subprodutos intermediários que, em alguns casos, apresentam toxicidade igual ou superior à do composto original, ampliando os riscos ambientais associados à presença do ibuprofeno (Olak-Kucharczyk *et al.*, 2022).

A exposição crônica ao ibuprofeno pode causar efeitos adversos em organismos aquáticos, mesmo em baixas concentrações. Entre os principais impactos vale mencionar as alterações fisiológicas e bioquímicas em peixes, invertebrados aquáticos e algas, incluindo efeitos sobre o sistema endócrino, estresse oxidativo, alterações reprodutivas e inflamatórias (Mezzanotte *et al.*, 2020; He *et al.*, 2022).

A presença contínua do ibuprofeno em ambientes aquáticos, aliada à possibilidade de efeitos cumulativos, reforça a necessidade de estudos voltados ao desenvolvimento de tecnologias complementares de tratamento, capazes de promover a remoção eficiente desse fármaco antes do lançamento de efluentes no meio ambiente.

A persistência do ibuprofeno e de seus potenciais impactos ambientais implica na necessidade de processos alternativos e avançados de tratamento, como a adsorção utilizando materiais de baixo custo para a remoção dessa substância. A aplicação de materiais como carvão ativado e zeólitas tem se mostrado promissora, uma vez que associa elevada capacidade adsorptiva à possibilidade de integração com sistemas de tratamento existentes, como reatores biológicos e sistemas alagados construídos (Kümmerer, 2020; He *et al.*, 2022).

3.6 Remoção de fármacos

A presença de fármacos em corpos hídricos envolve grandes desafios para os ecossistemas aquáticos e à saúde humana. Em função da capacidade que estas substâncias têm de exercer uma ação específica no corpo humano. Após o consumo, parte desses compostos não são assimilados e metabolizados pelo organismo e assim são excretados na forma metabolizada e não metabolizada pelas fezes e pela urina, chegando até as estações de tratamento de esgoto (Borges *et al.*, 2016; Tiwari *et al.* 2017; Escher *et al.*, 2019).

Com intuito de avaliar a remoção dos produtos farmacêuticos: claritromicina, clotrimazol, eritromicina, fluoxetina, ibuprofeno, sertralina, sinvastatina e tamoxifeno, Alenzi *et al.* (2021) investigaram o desempenho da digestão anaeróbica para remoção de fármacos. O estudo visou à utilização de lodo sintético no qual foram adicionados os fármacos de interesse. Com isso, foi observado que a presença dos fármacos pode afetar o processo de digestão anaeróbia e induzir a instabilidade e resultar na acumulação de ácidos graxos voláteis devido à diminuição dos percentuais de *Bacteroidetes* e *Euryarchaeota*. No entanto, foi observado pelos autores que os microrganismos anaeróbios foram eficientes na remoção dos antibióticos claritromicina e eritromicina. Os demais, entretanto, não apresentaram níveis satisfatórios de remoção.

Diariamente, altas cargas de produtos farmacêuticos são lançadas em cursos d'água, devido à ineficiência das estações de tratamento de esgoto. Em um estudo realizado em uma estação de tratamento de esgoto localizada em Porto Alegre-RS composta por tratamento preliminar seguido de reator UASB e lodos ativados, com vazão máxima de 4.115 L s^{-1} , Bisognin *et al.* (2021) detectaram 11 compostos farmacêuticos no efluente tratado.

No estudo realizado por Vassalle *et al.* (2020), não foi diferente. Os autores observaram a presença de fármacos no efluente tratado proveniente da cidade de Belo Horizonte/MG. No entanto, a metodologia de tratamento foi realizada em escala piloto, onde o sistema era composto por reator UABS seguido de duas lagoas de algas de alta taxa e um decantador para separar a biomassa microalgal. Assim como no estudo realizado por Bisognin *et al.* (2021), Vassalle *et al.* (2020) observaram que o reator UASB apresentou reduzida remoção dos produtos farmacêuticos. Entretanto, para o sistema reator UASB seguido de lagoas de algas de alta taxa os níveis se mostraram satisfatórios.

Segundo Cavalheri *et al.* (2023), a disposição de efluente tratado com a presença de microcontaminantes (fármacos) está associada às tradicionais tecnologias de tratamento de esgoto, estas que, conforme visto anteriormente, não são eficazes na remoção dessas substâncias. A presença de fármacos no efluente, seja ele tratado ou não, requer tratamentos completos e integrados aos processos convencionais. Dessa forma, Cavalheri *et al.* (2023) avaliaram a interação do reator foto-Fenton com o UASB e notaram que a partir desta configuração foi possível o aumento de eficiência de remoção de fármacos.

Além dos processos biológicos, para a remoção de fármacos há os processos de adsorção, metodologia de remoção de analitos de interesse mais comumente presentes em soluções aquosas. Durante o processo de adsorção ocorre a interações intermoleculares entre a água e o analito por meio das propriedades físicas e químicas dos processos adsortivos. Além disso, se comparados aos processos de oxidação e outros tratamentos, os processos adsortivos representam maior benefício, pois não produzem novos produtos após a aplicação do processo. Outros processos como o processo de oxidação, por exemplo, produzem subprodutos oxidados e transformados, ou seja, subprodutos que podem ser prejudiciais ao meio ambiente (Moosavi *et al.*, 2020; Vinayagam *et al.*, 2022).

O processo de adsorção envolve a interação do adsorvente com a água residuária na qual estão presentes os analitos de interesse, ou seja, os fármacos. Durante o processo as características do adsorvente irão influenciar o processo de adsorção. Os poros vazios favorecem a interação dos sítios ativos para a ligação com os poluentes (Liu *et al.*, 2023). O processo de adsorção pode ocorrer em diferentes tipos de interação como a fisissorção e

quimissorção. Na fisissorção, as moléculas do adsorvato e da substância adsorvente são atraídas uma pela outra por contatos eletrostáticos de superfície, ligações de hidrogênio e força de van der Waals. Na quimissorção, as moléculas do adsorvente e do soluto interagem de várias maneiras, incluindo ligações hidrofóbicas, covalentes e complexas (Popaliya; Mishra, 2023).

Rathi e Kumar (2021) consideram a técnica de adsorção uma abordagem bem-sucedida para a remoção dos fármacos, por apresentar baixo custo de instalação, alto desempenho e fácil design operacional. Além disso, os autores citam que a estação de tratamento de esgoto municipal por si só não é eficaz na eliminação de substâncias do grupo dos CEs, sendo necessária a adição de mais uma etapa de remoção nos sistemas de tratamento de esgoto, assim como o processo de adsorção.

Para os processos de adsorção podem ser criados filtros compostos por diferentes materiais que por meio das características físico-químicas terão a capacidade de promover a adsorção dos fármacos. O desempenho de adsorção de adsorventes está relacionado com as diferenças nos grupos funcionais presentes no material, porosidade e área superficial (Ahammad *et al.*, 2022).

Nos últimos anos, a utilização do carvão ativado derivado de biomassa para a remoção de fármacos tem recebido grande atenção da comunidade científica em função das características físico-químicas, como alta área específica, grande volume de poros, estrutura microporosa bem definida e química de superfície ajustável (Ouyang *et al.*, 2020).

A principal vantagem dos carvões ativados está interligada à capacidade de regeneração, reutilização e à facilidade de aplicação em modo contínuo, garantindo uma grande eficiência para a adsorção de contaminantes presentes em águas residuárias (Jaria *et al.*, 2019). Assim como Jaria *et al.* (2019), Popaliya e Mishra (2023) observaram que a zeólita é outro material facilmente acessível e de baixo custo em diversas regiões, que apresenta uma boa eficiência no uso de tecnologias de tratamento de água residuária e apresenta bons níveis de adsorção de fármacos.

De acordo com Azmi *et al.* (2020), como ocorre com a zeólita, os grupos funcionais do carvão ativado também melhoram a seletividade e a eficiência de adsorção. Os efeitos dos parâmetros operacionais, como os tipos de agente ativados, taxa de impregnação, composição, área superficial e volume microporoso interferem no processo de adsorção. Além disso, em função das propriedades químicas na superfície, o carvão ativado pode ser facilmente modificado com diversos grupos funcionais dependendo do tipo de poluente para o qual será feita a aplicação.

Prasad *et al.* (2023) avaliaram a adsorção do carvão ativado em diferentes ambientes aquosos simples e binários, em diferentes condições operacionais, visando à melhoria da eficiência de adsorção, dentre esses cenários, foi utilizada a zeólita juntamente com o carvão ativado em efluente sintético. Além disso, foram considerados parâmetros como a concentração inicial, dose adsorvente, tamanho de partícula adsorvente e intensidade inicial, que foram empregados como dados de entrada. Dessa forma, os autores observaram efeitos do diâmetro das partículas adsorventes, dosagens adsorventes e duração, também foi observado que o paracetamol era adsorvido por diferentes ligações de hidrogênio, e assim foi avaliada a eficiência adsorvida do paracetamol em que houve remoção de 98% para adsorção binária.

Motamedi, Mollahosseini e Negarestani (2022), a fim de promoverem a remoção de fármacos por meio do carvão ativado e da zeólita, buscaram obter as melhores condições do meio para o desenvolvimento do processo. Além disso, para o processo adsorptivo foram avaliados vários modelos de isothermas e cinéticas. E para o processo adsorptivo, a cinética de adsorção foi bem descrita pelos modelos de pseudo-segunda ordem e Elovich para ambos os sorventes. Além disso, o modelo de Freundlich explicou satisfatoriamente o mecanismo de sorção com valores de coeficiente de determinação superiores a 0,97. Para ambos os adsorbatos ocorreram fisissorção e quimissorção devido aos valores satisfatórios para Langmuir e Freundlich. Além disso, os modelos de pseudo-segunda ordem e Elovich descrevem melhor a cinética dos fármacos.

Ademais, vale ressaltar que vários aspectos afetam a eficácia do processo de adsorção, incluindo pH, dose adsorvente, temperatura, concentração, taxa de agitação e seletividade do material. A maioria dos adsorventes é determinada pela isoterma de Langmuir ou Freundlich, indicando fisissorção em multicamadas e quimissorção em monocamada, respectivamente (Popaliya; Mishra, 2023).

Pereira *et al.* (2023) realizaram estudos com o objetivo de avaliar a adsorção de produtos farmacêuticos presentes em águas residuárias utilizando carvão ativado, com intuito de promover interações eletrostáticas entre o adsorvente e o adsorvato. Para tanto, o pH do carvão ativado foi mantido em 5,5 controlando os pontos de carga zero das superfícies do adsorvato. Os autores verificaram que a capacidade de adsorção foi satisfatória para os produtos farmacêuticos. O equilíbrio foi alcançado em 30 minutos para todos os fármacos, com relação à cinética de adsorção, o modelo de Langmuir foi o que melhor descreveu os dados experimentais.

Embora o uso do carvão ativado seja considerado uma boa alternativa para a remoção de fármacos, a fim de otimizar o processo de adsorção Cuomo *et al.* (2023) analisaram a

combinação entre a zeólita e o carvão ativado. A adição da zeólita aumentou a remoção média global em 14% em comparação aos 55% obtidos utilizando apenas o carvão ativado. Os autores constataram que a combinação destes materiais tem o potencial de aumentar a atividade global de cada adsorvente. Logo, a combinação de ambos os adsorventes resultou numa remoção média global de 69%. Para o produto farmacêutico diclofenaco a eficiência de remoção foi de 78%, o que pode ser justificado pelos coeficientes de partição da solução/carvão ativado/zeólita. Esse comportamento, portanto, desempenha um papel crucial sobre as taxas de mecanismos de adsorção ao longo do tempo e a afinidade do adsorvente combinado com outro adsorvente, como a combinação de zeólita e carvão ativado.

3.7 Adsorção de ibuprofeno e naproxeno por carvão ativado e zeólitas

Atualmente, a adsorção tem sido amplamente estudada como tecnologia eficiente e versátil para a remoção de fármacos classificados como contaminantes emergentes em matrizes aquosas. Para Kummerr (2020) e He *et al.* (2020), o carvão ativado e a zeólita têm sido os materiais adsorventes mais utilizados, devido às propriedades físico-químicas favoráveis, elevada área superficial e potencial de aplicação em sistemas de tratamento de efluentes.

3.7.1 Adsorção em carvão ativado

O carvão ativado pode ser considerado um dos adsorventes mais eficazes para a remoção de fármacos como ibuprofeno e naproxeno, em função de sua estrutura altamente porosa e elevada área superficial específica. A interação entre o carvão ativado e esses fármacos ocorre predominantemente por forças de Van der Waals, interações hidrofóbicas e ligações π - π entre os anéis aromáticos dos compostos e a superfície carbonácea do adsorvente (Bolong *et al.*, 2020; He *et al.*, 2022).

De acordo com Mezzanotte *et al.* (2020) e Zhang *et al.* (2021), o ibuprofeno e o naproxeno apresentam elevada afinidade pelo carvão ativado, especialmente em pH próximo à neutralidade, condição na qual esses fármacos se encontram majoritariamente na forma ionizada. Apesar disso, a forte interação hidrofóbica ainda favorece a adsorção, resultando em altas eficiências de remoção, frequentemente superiores a 80% em sistemas em batelada.

Além da elevada eficiência, o carvão ativado apresenta como vantagens a possibilidade de aplicação tanto em sistemas convencionais quanto como material suporte em tecnologias híbridas, como filtros biológicos e sistemas alagados construídos. Entretanto, o custo associado à produção do carvão ativado comercial ainda representa um desafio para aplicações em larga escala, o que tem incentivado a busca por adsorventes alternativos obtidos a partir de resíduos

agroindustriais (Bolong *et al.*, 2020; He *et al.*, 2022), como os carvões ativados produzidos a partir da casca de coco, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e outros resíduos lignocelulósicos, os quais apresentam elevada disponibilidade, baixo custo e desempenho adsorptivo satisfatório após processos adequados de ativação física ou química (Silva *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2022).

Estudos têm apontado que o carvão ativado proveniente de resíduos lignocelulósicos pode apresentar áreas superficiais específicas com elevada afinidade por contaminantes emergentes, se comparado com a do carvão ativado comercial, incluindo fármacos como ibuprofeno e naproxeno, em função da presença de grupos funcionais oxigenados e da estrutura porosa desenvolvida durante o processo de ativação (Zhang; Geißen; Gal, 2021; Hassan *et al.*, 2022). Logo, a utilização de carvões ativados de origem residual contribui não apenas para a redução de custos operacionais, mas também para a valorização de resíduos agroindustriais, retornando para o ciclo produtivo, promovendo alternativas de tratamento de efluentes contendo fármacos (Ahmad *et al.*, 2020).

3.7.2 Adsorção em zeólitas

As zeólitas são aluminossilicatos cristalinos com estrutura microporosa, amplamente reconhecidas por sua capacidade de troca iônica e adsorção seletiva. Apesar de apresentarem área superficial inferior à do carvão ativado, as zeólitas naturais e modificadas têm demonstrado potencial significativo na remoção de fármacos ácidos, como ibuprofeno e naproxeno, especialmente quando modificadas quimicamente para o aumento da afinidade orgânica (Kümmerer, 2020; Pesik *et al.*, 2023).

A adsorção de fármacos pela zeólita ocorre principalmente por mecanismos de troca iônica, interações eletrostáticas e, em menor grau, por forças hidrofóbicas. O desempenho adsorptivo da zeólita é fortemente influenciado pelo pH da solução, composição iônica do meio e características estruturais do material, como razão Si/Al e tamanho de poros (Zhang *et al.*, 2021).

Estudos indicam que, embora as eficiências de remoção em zeólitas puras possam ser inferiores às observadas para o carvão ativado, esses materiais apresentam vantagens relevantes, como menor custo, abundância natural e elevada estabilidade química, o que favorece sua aplicação em sistemas de tratamento de efluentes de menor custo (He *et al.*, 2022).

O uso combinado de carvão ativado e zeólitas para adsorção pode ser considerado uma estratégia promissora para maximizar a eficiência de adsorção e reduzir custos operacionais. A combinação desses dois compostos permite avaliar simultaneamente as propriedades adsorptivas

do carvão ativado e a capacidade estrutural e de troca iônica das zeólitas, resultando em desempenho superior na remoção de ibuprofeno e naproxeno (Zhang *et al.*, 2021; Pesik *et al.*, 2023).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa reforça a relevância ambiental associada ao uso disseminado de fármacos como o ibuprofeno e o naproxeno, cuja elevada taxa de consumo, favorecida pela comercialização sem exigência de prescrição médica, contribui para a presença contínua em esgotos sanitários e ambientes aquáticos.

No contexto brasileiro, essa problemática é intensificada pela predominância de sistemas de tratamento de esgoto voltados essencialmente à remoção de matéria orgânica, os quais não são projetados visando à remoção de contaminantes emergentes, evidenciando uma lacuna tecnológica no saneamento nacional. Diante desse cenário, a pesquisa em questão visa a avaliação do uso de mídias reativas contendo carvão ativado e zeólita para a remoção de ibuprofeno e naproxeno, objetivando aliar a eficiência adsorptiva desses compostos. Além disso, a utilização de materiais de menor custo e ampla disponibilidade reforça o potencial dessas mídias reativas compostas por diferentes proporções de materiais, associadas a um agente aglomerante como uma alternativa tecnológica viável para aplicação em sistemas de tratamento de efluentes sanitários, como etapa complementar aos processos biológicos convencionais ou inseridas em unidades de tratamento que demandam por material suporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIÑAGA, N. *et al.* Occurrence and environmental risk assessment of non-steroidal anti-inflammatory drugs in wastewater and surface waters. **Science of the Total Environment**, v. 906, p. 167182, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167182>.

AHAMMAD, N. A. *et al.* A mini review of recent progress in the removal of emerging contaminants from pharmaceutical waste using various adsorbents. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 60, p. 124459–124473, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30026-2>.

AHMAD, T. *et al.* Oil palm biomass-based adsorbents for the removal of emerging contaminants from wastewater: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 262, p. 110357, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110357>.

ALENZI, A. *et al.* Pharmaceuticals effect and removal, at environmentally relevant concentrations, from sewage sludge during anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 319, p. 124102, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124102>.

AMÉRICO, J. H. P.; BENINI, S. M. Monitoramento de recursos hídricos e parâmetros de qualidade de água em bacias hidrográficas. In: _____. **Bacias hidrográficas: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Tupã: ANAP, 2018. p. 204–220.

AMÉRICO, J. H. P. *et al.* Fármacos em uma estação de tratamento de esgoto na região Centro-Oeste do Brasil e os riscos aos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 61–67, 2012. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p61-67>.

ARSAND, J. B. *et al.* Presence of antibiotic resistance genes and its association with antibiotic occurrence in Dilúvio River in southern Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 738, p. 139781, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139781>.

AUS DER BEEK, T. *et al.* Pharmaceuticals in the environment: global occurrences and perspectives. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 35, n. 4, p. 823–835, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.3339>.

AZMI, N. Z. M. *et al.* Recent advances in biomass based activated carbon for carbon dioxide capture: a review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 116, p. 1–20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.08.041>.

BERETTA, M. *et al.* Occurrence of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in marine sediments in the Todos os Santos Bay and the north coast of Salvador, Bahia, Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1278–1286, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0884-6>.

BISOGNIN, R. P. *et al.* Occurrence and fate of pharmaceuticals in effluent and sludge from a wastewater treatment plant in Brazil. **Environmental Technology**, v. 42, n. 15, p. 2292–2303, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1692821>.

BOLONG, N. *et al.* A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. **Desalination**, v. 239, n. 1–3, p. 229–246, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.020>.

BORGES, R. M. *et al.* Uso de filtros de carvão ativado granular associado a microrganismos para remoção de fármacos no tratamento de água de abastecimento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 709–720, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016145471>.

BRANCO, F. O. L. *et al.* Contaminantes emergentes nas bacias hidrográficas brasileiras e seus potenciais efeitos a espécies ameaçadas de extinção. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 9, n. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5205101>.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Insumos farmacêuticos: anuário sobre a indústria farmacêutica no Brasil. Brasília, DF: ANVISA, 2023. Disponível em:

<https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2023/anvisa-divulga-dados-do-anuario-sobre-a-industria-farmaceutica-no-brasil>. Acesso em: 29 jun. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, DF: CONAMA, 2005. Disponível em:

https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450.

Acesso em: 29 jan. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF: CONAMA, 2011. Disponível em:

https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=646.

Acesso em: 29 jan. 2026.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA). *Panorama do saneamento básico no Brasil 2024*. Brasília, DF, 2024. Disponível em: [https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-](https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa)

[programas/saneamento/sinisa](https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa). Acesso em: 15 jun. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 7 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 15 jun. 2026.

BUSER, H. R.; POIGER, T.; MÜLLER, M. D. Occurrence and fate of the pharmaceutical drug ibuprofen in surface waters and in wastewater. **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 10, p. 5899–5908, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00203>.

CAMPANHA, M. B. *et al.* A 3-year study on occurrence of emerging contaminants in an urban stream of São Paulo State of Southeast Brazil. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 22, n. 10, p. 7936–7947, 2015. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s11356-014-3929-x>.

CAVALHERI, P. S. *et al.* Ketoprofen and diclofenac removal and toxicity abatement in a real scale sewage treatment plant by photo-Fenton process with design of experiments. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 5, p. 110699, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110699>.

CHAVES, M. J. S.; BARBOSA, S. C.; PRIMEL, E. G. Emerging contaminants in Brazilian aquatic environment: identifying targets of potential concern based on occurrence and ecological risk. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 67528–67543, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16065-5>.

CHEN, Y.; LIN, M.; ZHUANG, D. Wastewater treatment and emerging contaminants: bibliometric analysis. **Chemosphere**, v. 297, p. 133932, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133932>.

CHERNICHARO, L. C. A. *et al.* Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. Brasília, DF: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto, 2017.

CRINI, N. M. *et al.* Removal of emerging contaminants from wastewater using advanced treatments: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, n. 2, p. 1333–1375, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01379-1>.

CUOMO, M. *et al.* Using zeolite filters to reduce activated carbon use in micropollutant removal from wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v. 56, p. 104298, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104298>.

DE MORAIS, J. L. R.; DE AGUIAR VIAN, M.; COELHO, R. S. Avaliação dos índices de qualidade das águas dos principais rios do município de São Roque-SP. **Revista Scientia Vitae**, v. 2, n. 7, p. 40–49, 2023.

ESCHER, S. M. A. *et al.* A problemática ambiental da contaminação dos recursos hídricos por fármacos. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, n. 51, p. 141–148, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190430>.

FALDA, L. P.; ASSUNÇÃO, E. G.; KURODA, E. K. Concepções de biofiltração aplicada ao pré-tratamento de águas de abastecimento para remoção de contaminantes emergentes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 28, p. e20220174, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220174>.

FONSECA, N. N. *et al.* Toxicity of photodegradation products of naproxen in amphibian larvae. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 40, n. 9, p. 2008–2019, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5104>.

GAFFNEY, V. *et al.* Contaminantes emergentes – fármacos: monitorização, avaliação do risco ambiental e do risco para a saúde humana. **Águas e Resíduos**, p. 15–27, 2016.

GARCÍA-GALÁN, M. J. *et al.* Pharmaceuticals in wastewater treatment plants: occurrence, removal and environmental impact. **Water Research**, v. 204, p. 117597, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117597>.

GARRISON, A. W. *et al.* Identification and analysis of organic pollutants in water. In: KEITH, C. H. (org.). **Identification and analysis of organic pollutants in water**. Michigan: Ann Arbor Science, 1976. p. 517–566.

GONZÁLEZ, P. O. I.; LÓPEZ, Z. M. Á.; CABRAL, R. H. Pharmaceuticals market, consumption trends and disease incidence are not driving the pharmaceutical research on water and wastewater. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 5, p. 2532, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18052532>.

GUERRA, L. O. *et al.* Are environmental levels of nonsteroidal anti-inflammatory drugs a reason for concern? Chronic life-cycle effects of naproxen in zebrafish. **Aquatic Toxicology**, v. 262, p. 106190, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106190>.

HASSAN, M. *et al.* Sustainable production of activated carbon from agricultural waste and its application for pharmaceutical removal from water. **Chemosphere**, v. 286, p. 131695, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131695>.

HE, Y. *et al.* Removal of pharmaceuticals from wastewater: a review of current treatment technologies and perspectives. **Water Research**, v. 212, p. 118095, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118095>.

JARIA, G. *et al.* Obtaining granular activated carbon from paper mill sludge: a challenge for application in the removal of pharmaceuticals from wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 653, p. 393–400, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.439>.

KOŁECKA, K.; GAJEWSKA, M.; CABAN, M. From the pills to environment: prediction and tracking of non-steroidal anti-inflammatory drug concentrations in wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 825, p. 153611, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153611>.

KOMOLAFE, O. *et al.* Occurrence and removal of micropollutants in full-scale aerobic, anaerobic and facultative wastewater treatment plants in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 287, p. 112286, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112286>.

KRAMER, R. D. *et al.* Determinação de anti-inflamatórios na água e sedimento e suas relações com a qualidade da água na bacia do Alto Iguaçu, Curitiba-PR. **Revista Brasileira**

de Recursos Hídricos, v. 20, n. 3, p. 657–667, 2015. DOI:

<https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n3.p657-667>.

KUMAR, P. *et al.* Agricultural waste-derived activated carbon for adsorption of pharmaceuticals and personal care products: a sustainable approach. **Science of the Total Environment**, v. 839, p. 156232, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156232>.

KÜMMERER, K. **Pharmaceuticals in the environment: sources, fate, effects and risks**. 3. ed. Berlin: Springer, 2020.

LIMA, D. R. S. *et al.* Fármacos e desreguladores endócrinos em águas brasileiras: ocorrência e técnicas de remoção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 1043–1054, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017145405>.

LIMA, E. C. *et al.* Adsorption of emerging contaminants onto activated carbons prepared from agro-industrial wastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 402, p. 123537, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123537>.

LIU, Y. *et al.* Toxic effects of environmentally relevant concentrations of naproxen on *Daphnia magna*: antioxidant system disruption, developmental toxicity and reproductive impairment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, p. 34512–34524, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33157-7>.

LIU, Z. H. *et al.* Occurrence, removal and risk evaluation of ibuprofen and acetaminophen in municipal wastewater treatment plants: a critical review. **Science of the Total Environment**, p. 164600, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164600>.

MATOS, A. T. **Qualidade do meio físico ambiental: práticas de laboratório**. Viçosa: Editora UFV, 2012. 150 p.

MEZZANOTTE, V. *et al.* Chronic exposure to ibuprofen: effects on freshwater organisms and environmental risk assessment. **Environmental Pollution**, v. 265, p. 114756, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114756>.

MOLEZ, S. *et al.* Photocatalytic degradation of naproxen using visible-light activated TiO₂-based catalysts: mechanisms and environmental relevance. **Molecules**, v. 29, n. 23, p. 5752, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29235752>.

MONTAGNER, C. C.; JARDIM, W. F. Spatial and seasonal variations of pharmaceuticals and endocrine disruptors in the Atibaia River, São Paulo State (Brazil). **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 22, p. 1452–1462, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-50532011000800015>.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Química Nova**, v. 40, p. 1094–1110, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170091>.

MOTAMEDI, M.; MOLLAHOSSEINI, A.; NEGARESTANI, M. Ultrasonic-assisted batch operation for the adsorption of rifampin and reactive orange 5 onto engineered zeolite–polypyrrole/TiO₂ nanocomposite. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 8, p. 7547–7564, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03606-4>.

MOYA-LLAMAS, M. J.; PACAZOCCHI, M. G.; TRAPOTE, A. Respirometric tests in a combined UASB-MBR system treating wastewater containing emerging contaminants at different OLRs and temperatures: biokinetic analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 345, p. 118643, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118643>.

NGUYEN, P. Y. *et al.* A review of the biotransformations of priority pharmaceuticals in biological wastewater treatment processes. **Water Research**, v. 188, p. 116446, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116446>.

OLAK-KUCHARCZYK, M. *et al.* Photodegradation of ibuprofen in aqueous solutions: kinetics, transformation products and toxicity evaluation. **Chemosphere**, v. 307, p. 135807, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135807>.

OLIVEIRA, J. F. *et al.* Quantification, removal and potential ecological risk of emerging contaminants in different organic loads of swine wastewater treated by integrated biological reactors. **Chemosphere**, v. 260, p. 127516, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127516>.

OLIVEIRA, S.; CORRÊA, M. A.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1: análise de desempenho. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, p. 347–357, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000200015>.

OUYANG, J. *et al.* Biomass-derived activated carbons for the removal of pharmaceutical micropollutants from wastewater: a review. **Separation and Purification Technology**, v. 253, p. 117536, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117536>.

PAN, S. *et al.* Impact of naproxen on wastewater biological treatment: focus on reactor performance and mechanisms. **Water**, v. 15, n. 14, p. 2615, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15142615>.

PARIDA, V. K. *et al.* Emerging contaminants in wastewater: a critical review on occurrence, existing legislations, risk assessment, and sustainable treatment alternatives. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 5, p. 105966, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105966>.

PAROLINI, M. Toxicity of the non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) acetylsalicylic acid, paracetamol, diclofenac, ibuprofen and naproxen towards freshwater invertebrates: a review. **Science of the Total Environment**, v. 740, p. 140043, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140043>.

PEREIRA, D. *et al.* Carvão ativado magnético ex-situ para a adsorção de três produtos farmacêuticos com propriedades físico-químicas distintas de águas residuais reais. **Journal of Hazardous Materials**, v. 443, p. 130258, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130258>.

PESIK, J.; ZALEWSKA, M.; STANISZEWSKA, M. Indirect photolysis of pharmaceuticals in surface waters: role of dissolved organic matter and reactive oxygen species. **Journal of Hazardous Materials**, v. 443, p. 130245, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130245>.

POPALIYA, M.; MISHRA, A. Zeólita modificada como adsorvente para corantes, medicamentos e remoção de metais pesados: uma revisão. **Revista Internacional de Ciência e Tecnologia Ambiental**, v. 11, p. 12919–12936, 2023.

PRASAD, K. *et al.* Predicting the adsorption efficiency using machine learning framework on a carbon-activated nanomaterial. **Adsorption Science & Technology**, v. 2023, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1155/2023/1001456>.

QUADRA, G. R. *et al.* Do pharmaceuticals reach and affect the aquatic ecosystems in Brazil? A critical review of current studies in a developing country. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 1200–1218, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s11356-016-7836-1>.

QUEIROZ, F. B. *et al.* Determination of endocrine disrupters and pharmaceuticals in sewage samples by tandem solid phase clean up/extraction and high performance liquid chromatography-negative and positive electrospray high-resolution mass spectrometry.

Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 25, p. 298–312, 2014. DOI:

<https://doi.org/10.5935/0103-5053.20140142>.

RATHI, B. S.; KUMAR, P. S. Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. **Environmental Pollution**, v. 280, p. 116995, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116995>.

RIZZO, H. *et al.* Achados macroscópicos de cabras após distocia: anasarca fetal e hematoma intramural no corpo do útero. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 6, n. 2, p. 1681–1692, 2023. DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaer.v6i2.1024>.

RODRIGUES, F. N. **Identificação de desreguladores endócrinos em águas superficiais do município de Lavras-MG e desenvolvimento de adsorvedores a partir de resíduos orgânicos**. 2019. 170 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

RODRIGUES, K. L. T. *et al.* Chemometric approach to optimize the operational parameters of ESI for the determination of contaminants of emerging concern in aqueous matrices by LC-IT-TOF-HRMS. **Microchemical Journal**, v. 117, p. 242–249, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2014.06.013>.

ROVERI, V. *et al.* Occurrence and risk assessment of pharmaceuticals and cocaine around the coastal submarine sewage outfall in Guarujá, São Paulo State, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 11384–11400, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11384-0>.

SAIDULU, D. *et al.* A review on occurrences, ecotoxic effects, and remediation of emerging contaminants from wastewater: special emphasis on biological treatment based hybrid systems. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105282, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105282>.

SAMAL, K.; MAHAPATRA, S.; ALI, M. H. Pharmaceutical wastewater as emerging contaminants: treatment technologies, impact on environment and human health. **Energy Nexus**, v. 6, p. 100076, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.100076>.

SILVA, E. C.; SOARES, V. R.; FAJARDO, A. R. Removal of pharmaceuticals from aqueous medium by alginate/polypyrrole/ZnFe₂O₄ beads via magnetic field enhanced adsorption. **Chemosphere**, v. 316, p. 137734, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137734>.

SILVA, J. R. *et al.* Naproxen removal challenges in wastewater treatment: a global overview. **Science of the Total Environment**, v. 865, p. 161190, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161190>.

SILVA, T. L.; SILVA, M. G. C.; VIEIRA, M. G. A. Coconut shell-based activated carbon for pharmaceutical adsorption from aqueous solutions. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 33, p. 41464–41478, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10156-5>.

STARLING, M. C. V. M.; AMORIM, C. C.; LEÃO, M. M. D. Occurrence, control and fate of contaminants of emerging concern in environmental compartments in Brazil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 372, p. 17–36, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.05.001>.

STELATO, E. S. *et al.* Avaliação da presença de resíduos de anti-inflamatórios não esteroides nos córregos Veado e Cedro do município de Presidente Prudente (SP), Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 39, p. 97–113, 2016.

STUMPF, M. *et al.* Polar drug residues in sewage and natural waters in the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 225, n. 1–2, p. 135–141, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00357-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00357-4).

TIWARI, A. K.; PAL, D. B. Nutrients contamination and eutrophication in the river ecosystem. In: Madhav, S. *et al.* (ed.) **Ecological significance of river ecosystems**. Elsevier, 2022. p. 203–216.

TONETTI, A. L. *et al.* **Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas: referencial para a escolha de soluções**. Campinas: Unicamp, 2018.

VASSALLE, L. *et al.* Can high rate algal ponds be used as post-treatment of UASB reactors to remove micropollutants? **Chemosphere**, v. 248, p. 125969, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125969>.

VASSALLE, L. *et al.* Lagoas de algas de alta taxa podem ser usadas como pós-tratamento de reatores UASB para remoção de micropoluentes? **Química Nova** (corrigido de “Quimosfera”), v. 248, p. 125969, 2020.

VERBEECK, R. K.; BLACKBURN, J. L.; LOEWEN, G. R. Clinical pharmacokinetics of ibuprofen. **Clinical Pharmacokinetics**, v. 8, n. 4, p. 297–331, 1983. DOI: <https://doi.org/10.2165/00003088-198308040-00002>.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

XING, X. *et al.* Self-purification of actual wastewater via microbial-synergy driving of catalyst-surface microelectronic field: a pilot-scale study. **Journal of Hazardous Materials**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131744>.

XU, G. *et al.* Distribuição de coliformes fecais e avaliação de riscos à saúde em águas superficiais em uma bacia hidrográfica de uso intensivo urbano. **Revista de Hidrologia**, v. 604, p. 127204, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127204>.

ZHANG, X. *et al.* Persistence and toxicity of naproxen phototransformation products under UV–visible irradiation. **Science of the Total Environment**, v. 903, p. 166524, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166524>.

ZHANG, Y.; GEIßEN, S. U.; GAL, C. Carbamazepine and ibuprofen removal from water by adsorption on activated carbon prepared from agricultural waste. **Chemosphere**, v. 285, p. 131430, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131430>.

SEGUNDA PARTE

Artigo 1 - Elaborado conforme a norma NBR 6022

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MÍDIAS REATIVAS CIMENTÍCIAS
COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE ADSORVENTES PARA REMOÇÃO DE
IBUPROFENO E NAPROXENO EM SOLUÇÃO AQUOSA E ESGOTO SANITÁRIO**

RESUMO

Processos adsorptivos são importantes para aumentar as eficiências de remoção de fármacos em estações de tratamento de esgoto. Assim, o objetivo da pesquisa foi avaliar a remoção de fármacos em solução aquosa e do esgoto sanitário tratado na ETE da Universidade Federal de Lavras (UFLA) por meio de mídias reativas desenvolvidas com diferentes materiais. Para confecção das mídias reativas foram utilizados cimento Portland, carvão ativado e zeólitas em porcentual mássico de 50% de cimento e 50% de zeólita (CCa0Z50), 50% de cimento, 25% de zeólita e 25% de carvão ativado (CCa25Z25) e 50% de cimento 50% de carvão ativado (CCa50Z0). As mídias reativas apresentaram formato de tronco de pirâmide com dimensões entre 1 e 2 cm. Diferentes concentrações de naproxeno e ibuprofeno (1 mg L^{-1} , 2 mg L^{-1} , 3 mg L^{-1} , 4 mg L^{-1} e 5 mg L^{-1}) foram submetidas ao ensaio de sorção em lote, com 70 rpm, por 4 horas a 25°C . Os resultados evidenciaram remoção de ibuprofeno e naproxeno em solução aquosa entre 91 e 98% e 75 e 91%, respectivamente. As maiores eficiências foram observadas para as maiores concentrações que alcançaram em torno de $0,160 \text{ mg g}^{-1}$. Para o esgoto sanitário com adição dos fármacos, foram alcançadas remoções de $0,097 \text{ mg g}^{-1}$ e $0,304 \text{ mg g}^{-1}$ para o ibuprofeno e o naproxeno; enquanto para o esgoto tratado, valores menores da ordem de $0,006 \text{ mg g}^{-1}$ e $0,010 \text{ mg g}^{-1}$, respectivamente, foram obtidos, com eficiência de 83 e 80%. Os resultados obtidos na presente pesquisa demonstram que as mídias reativas desenvolvidas a partir de cimento, zeólita e carvão ativado apresentam elevado potencial para a remoção de ibuprofeno e naproxeno, tanto em solução aquosa sintética quanto em efluente sanitário tratado.

Palavras-Chave: Sorção, fármacos, carvão ativado, zeólitas, compósitos cimentícios.

ABSTRACT

Adsorption processes are important for increasing the efficiency of pharmaceutical removal in wastewater treatment plants. Therefore, the objective of this research was to evaluate the removal of pharmaceuticals in aqueous solution and from treated sanitary sewage at the wastewater treatment plant of the Federal University of Lavras (UFLA) using reactive media developed with different materials. The reactive media were made using Portland cement, activated carbon, and zeolites in mass percentages of 50% cement and 50% zeolite (CCa0Z50), 50% cement, 25% zeolite, and 25% activated carbon (CCa25Z25), and 50% cement and 50% activated carbon (CCa50Z0). The reactive media had a truncated pyramid shape with dimensions between 1 and 2 cm. Different concentrations of naproxen and ibuprofen (1 mg L^{-1} , 2 mg L^{-1} , 3 mg L^{-1} , 4 mg L^{-1} , and 5 mg L^{-1}) were subjected to a batch sorption test at 70 rpm for 4 hours at 25°C . The results showed ibuprofen and naproxen removal in aqueous solution between 91% and 98% and 75% and 91%, respectively. The highest efficiencies were observed for the highest concentrations, reaching around 0.160 mg g^{-1} . For sanitary sewage with added pharmaceuticals, removals of 0.097 mg g^{-1} and 0.304 mg g^{-1} were achieved for ibuprofen and naproxen; while for treated sewage, lower values of approximately 0.006 mg g^{-1} and 0.010 mg g^{-1} , respectively, were obtained, with efficiencies of 83% and 80%. The results obtained in this research demonstrate that reactive media developed from cement, zeolite, and activated carbon have high potential for the removal of ibuprofen and naproxen, both in synthetic aqueous solution and in treated sanitary effluent.

Key-words: Sorption, pharmaceuticals, activated carbon, zeolites, cementitious composites.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o consumo de produtos farmacêuticos no Brasil vem crescendo significativamente, isso ocorre em função do acesso de medicamentos que podem ser vendidos sem receita médica. De acordo com o Anuário Estatístico do Mercado Farmacêutico do ano de 2024, cerca de 5,77 bilhões de embalagens de medicamentos foram comercializadas no país em 2023, em que aproximadamente 21% das embalagens eram de medicamentos isentos de prescrição (Brasil, 2024). O que mantém o Brasil entre os maiores consumidores de fármacos do mundo nas últimas décadas (Gonçalves *et al.*, 2024).

Os fármacos são considerados contaminantes emergentes que são removidos ou descartados de forma inadequada e podem entrar no meio ambiente por diversas vias, como descarga de águas residuárias, escoamento de águas pluviais, irrigação agrícola e fontes antropogênicas (Liu; Yina; Wu, 2019; Sui, Q. *et al.*, 2022). Ao serem consumidos, parte dos fármacos são metabolizados pelo organismo humano, enquanto outra parte é excretada através da urina e fezes (Melo *et al.*, 2023; Gosai, *et al.*, 2024).

Dentre os compostos mais utilizados e detectados em esgotos e corpos d'água estão os anti-inflamatórios não esteroidais, como ibuprofeno e naproxeno, medicamentos que comumente são muito utilizados devido à característica analgésica e antipirética (Aguñaga *et al.*, 2024). Pelo fato de apenas cerca de 5% da dose destes medicamentos ser excretada na forma original (Verbeeck; Blackburn; Loewen, 1983), são encontrados nas águas superficiais em concentrações variam entre 1 a 2.000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Wojcieszynska, 2020; Li *et al.*, 2023). Mesmo em concentrações consideradas traço, a presença desses fármacos no ambiente aquático pode acarretar impactos devido à capacidade de causar efeitos tóxicos em organismos aquáticos como estresse oxidativo, danos a órgãos, disfunção reprodutiva, crescimento reduzidos na comunidade aquática, podendo influenciar nas cadeias alimentares e funções de ecossistemas (Hejna; Kapuścińska; Aksmann, 2024; Grădinariu *et al.*, 2025; Hernández-Zamora *et al.*, 2025).

Para minimizar os impactos ambientais, a remoção de fármacos dos esgotos torna-se importante. Entretanto, os métodos convencionais de tratamento de água e esgoto não são projetados para remover completamente os compostos farmacêuticos, resultando na remoção parcial desses micropoluentes e aumentando sua prevalência no abastecimento global de água potável, o que é contrário aos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU para alcançar a agenda 2030. Produtos farmacêuticos em águas superficiais representam um risco significativo tanto para os ecossistemas quanto para a saúde humana, exigindo intervenção imediata para solucionar esse problema. Embora as estações de tratamento de esgoto removam

muitos poluentes de forma eficaz, a remoção incompleta de produtos farmacêuticos demanda mais pesquisas (Chaber; Gworek, Kalinowski, 2025). A persistência, a baixa taxa de biodegradação e resistência aos tratamentos convencionais de esgoto, faz com que o ibuprofeno e naproxeno sejam frequentemente encontrados em efluentes tratados e em águas superficiais, resultando em uma fonte significativa de poluição química difusa (Petrie; Camacho-Muñoz, 2021, Santos *et al.*, 2022).

Mansouri *et al.* (2021) demonstraram que métodos de tratamento como: oxidação, fotólise, degradação por UV, osmose reversa e adsorção, isoladamente, são insuficientes para remover completamente os resíduos farmacêuticos das estações de tratamento de esgoto. Esses resultados sugerem a inclusão de tratamentos terciários para alcançar a eliminação quase completa nos efluentes. Estudos têm evidenciado que o método de adsorção é preferível para a descontaminação de soluções contendo fármacos em relação à biodegradação, ozonização, fotodegradação e processos de oxidação avançada (Abu Sharib *et al.*, 2024). A adsorção é considerada uma técnica de remediação potencialmente útil devido à sua alta eficiência, menor custo, não toxicidade e quantidades insignificantes de lodo gerado (Badawy *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024).

Os materiais que podem ser utilizados como adsorventes são diversos, incluindo, por exemplo: carvão ativado de origem mineral ou vegetal, quitosana, cinzas volantes, resinas orgânicas e zeólitas (Abo *et al.*, 2025; Mechnou *et al.*, 2025). Apesar de vários trabalhos sobre adsorção de fármacos em diferentes materiais, não se observou na literatura a utilização de cimento para esta finalidade. Apenas para a adsorção de fósforo e metais (Yu *et al.*, 2024). No processo de adsorção, além da eficiência, é importante analisar o desenvolvimento dos adsorventes e o custo de aplicação, bem como a capacidade de regeneração. Um adsorvente de menor custo é definido como um material que requer pouco processamento, é abundante na natureza ou pode ser um resíduo ou subproduto de uma atividade industrial, em que a economia na aquisição pode compensar o custo do processamento (Quesada *et al.*, 2019).

Neste contexto, o desenvolvimento de métodos práticos, econômicos e ambientalmente amigáveis, com a utilização de resíduos para o desenvolvimento de mídias reativas adsorptivas para aplicação em sistemas biológicos de tratamento de esgotos amplamente utilizados em diversas regiões do mundo torna-se mais uma alternativa sem precisar realizar mudanças drásticas nas estações de tratamento, além de atendimento aos conceitos de economia circular.

O presente trabalho teve por objetivo produzir e caracterizar mídias reativas de base cimentícia, agregadas com zeólitas e carvão ativado orgânico, avaliar o desempenho na

adsorção de ibuprofeno e naproxeno em solução, e identificar os mecanismos que governaram o processo de adsorção.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios do Departamento de Engenharia Ambiental e no laboratório multiusuário Central de Análise e Prospecção Química (CAPQ) do Departamento de Química, na Universidade Federal de Lavras.

2.1 Confeção das mídias reativas

A confecção das mídias reativas foi feita a partir da mistura de frações de cimento Portland (CP II E – 32), carvão ativado comercial a base de casca de coco e zeólita sob adição em porcentual mássico, dividido em três tipos conforme apresentado na Tabela 1.

O carvão ativado e a zeólita foram peneirados de forma a manter a granulometria entre 0,75 e 2,0 mm. Os materiais, em diferentes proporções, foram misturados manualmente de forma a proporcionar homogeneidade. Para o tratamento CCa0Z50, foi utilizado 1 kg de cimento e 1 kg de zeólita, CCa25Z25 1 kg de cimento, 0,5 kg de zeólita e 0,5 kg de carvão ativado, CCa50Z0 1 kg de cimento e 1 kg de carvão ativado. Posteriormente, foi adicionado um litro de água, em cada tratamento.

A massa cimentícia com os adsorventes foi disposta em bandejas plásticas de plantio multicelulares, com capacidade para 162 células, foi realizada a mistura manual dos componentes para proporcionar homogeneidade. Após isso, a massa cimentícia foi submetida a estruturas para molde, com dimensões entre 1 e 2 cm.

Tabela 1. Especificação dos percentuais, em massa, de cada material a ser utilizado na confecção dos compósitos reativos para adsorção de fármaco.

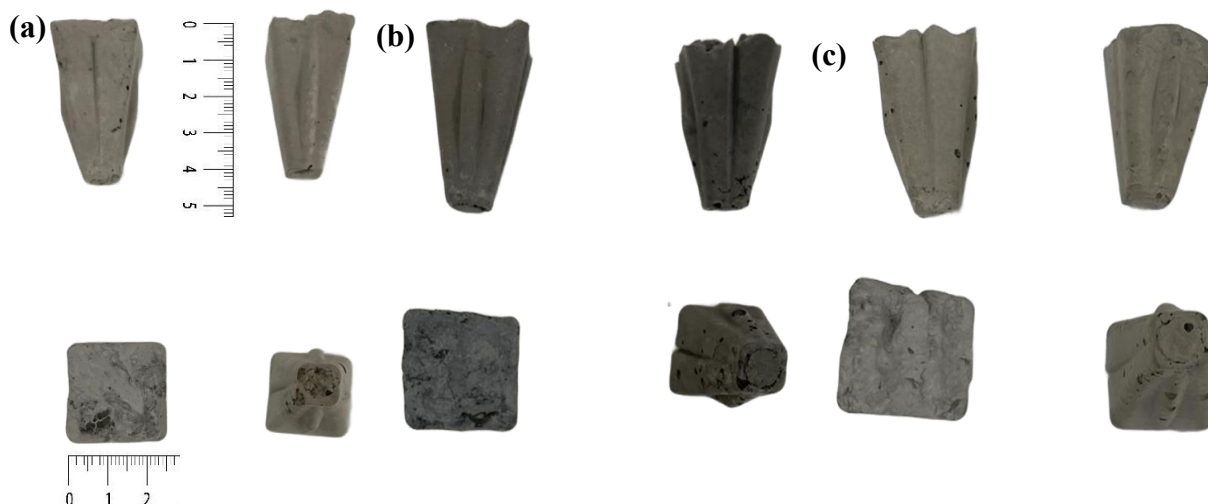
Ensaio	Tratamentos	Cimento (%)	Carvão ativado (%)	Zeólitas (%)	Peso médio da mídia (g)
I	CCa0Z50	50	0	50	37,84
II	CCa25Z25	50	25	25	33,50
III	CCa50Z0	50	50	0	28,43

Fonte: Da autora (2026).

O desmolde foi efetuado no dia 05 de maio de 2024, seguido do processo contínuo de cura externamente às bandejas, até o dia 07 de julho. Foram produzidos uma média de 95

compósitos, com forma semelhante ao tronco de pirâmide, com dimensões aproximadas de altura, base inferior e base superior de 4,3 cm, 2,3 cm, 1,1 cm, respectivamente (Figura 2.1). O acondicionamento dos compósitos ocorreu em uma sala à temperatura ambiente, até sua utilização nos ensaios adsortivos.

Figura 1. Visualização das faces das mídias produzidas com os diferentes tratamentos (a) CCa0Z50, (b) CCa25Z25e (c) CCa50Z0.



Fonte: Da autora (2026).

O cimento, o carvão ativado e a zeólita tiveram o pH medido em águas conforme Silva (2009), e foram caracterizados por Fluorescência de Raio -X – Portátil (PXRF) no Laboratório de Fluorescência de Raios X do Departamento de Ciência do Solo da UFLA (Tabela 2), onde os princípios básicos de instrumentação a detectores portáteis, podem ser compreendidos a partir do estudo de Marguí, Queralt e De Almeida (2022).

A determinação do ponto de carga zero (PCZ) foi realizada transferindo-se 50 mL de solução de KNO_3 0,01 M para dez frascos fechados. O pH inicial das soluções nos frascos foi ajustado para diferentes valores entre 1 e 13 por pequenas adições de HNO_3 0,1 mol L^{-1} ou NaOH 0,1 mol L^{-1} e medido em um pHmetro. A massa de 0,1 g de cada material (cimento, carvão ativado e zeólita) foi adicionada a todos os frascos e agitada por 48 h. Posteriormente, o pH final foi medido. A diferença entre o pH inicial e o final (ΔpH) foi plotada em função dos valores de pH inicial e a intersecção com o eixo y foi determinada como pH_{PCZ} (Shooto; Thabede, 2025).

Tabela 2. Composição química do cimento, carvão ativado e zeólita utilizados na presente pesquisa.

Atributos químicos	Cimento	Carvão ativado (%)	Zeólitas
MgO	1,07	0,55	0,55
Al ₂ O ₃	3,34	19,48	4,16
SiO ₂	14,59	20,34	35,86
P	0,13	0,09	0,01
S	0,74	0,01	0,06
K ₂ O	0,75	13,63	0,61
Ca	28,22	<LD	1,21
Mn	0,07	0,02	0,04
Fe	1,24	<LD	1,27

LD: Limite de detecção; MgO: Óxido de magnésio; Al₂O₃: Óxido de alumínio; SiO₂: Dióxido de silício (quartzo); P: Fósforo; S: Enxofre; K₂O: Óxido de potássio; Ca: Cálcio; Mn: Manganês; Fe: Ferro.

2.2 Ensaios de adsorção dos fármacos em solução aquosa

Foram preparadas soluções-padrão de ibuprofeno (2-(4-(2-methylpropyl)phenyl)propanoic acid, > 98%; Sigma-Aldrich®) e naproxeno (2-(6-Metoxinaftalen-2-il)propanoico, > 99,9%; Sigma-Aldrich®), com água ultrapura (Milli-Q®) nas concentrações de 1, 2, 3, 4 e 5 mg L⁻¹. As soluções foram mantidas sob refrigeração a 4°C e retiradas do refrigerador apenas antes da manipulação. As características dos fármacos estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Informações e características dos fármacos ibuprofeno e naproxeno.

Nome	Sigla	Fórmula molecular	Massa molar	pKa	Log K _{ow}
Ibuprofeno	IBU	C ₁₃ H ₁₈ O ₂	206,28 g mol ⁻¹	4,85	3,97
Naproxeno	NPX	C ₁₄ H ₁₄ O ₃	230,26 g mol ⁻¹	4,2	3,18

Fonte: Iupac (2014).

De forma independente para cada fármaco e para cada mídia reativa, procedeu-se ao ensaio de sorção. Duas unidades de cada mídia reativa de massa, conforme a Tabela 4 e a Tabela 5 foram colocadas em um erlenmeyer de 250 mL, no qual foi adicionado 100 mL de cada

solução padrão. Os erlenmeyers, foram inseridos na mesa agitadora com controle de temperatura por 40 minutos, a 25°C e rotação de 80 rpm.

Tabela 4. Peso das médias reativas (g) utilizadas em cada ensaio de sorção do fármaco ibuprofeno.

Concentração do fármaco (mg L ⁻¹)	Repetição 1			Repetição 2		
	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio
	I	II	III	I	II	III
1	30,12	36,48	29,88	38,81	35,49	30,06
2	39,93	38,6	29,03	40,09	38,05	30,06
3	38,28	37,76	30,26	40,56	34,13	29,09
4	37,25	37,25	28,9	37,15	33,62	29,32
5	39,5	39,94	31,78	37,29	34,65	29,72

Fonte: Da Autora (2025).

Tabela 5. Peso das médias reativas (g) utilizadas em cada ensaio de sorção do fármaco naproxeno.

Concentração do fármaco (mg L ⁻¹)	Repetição 1			Repetição 2		
	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio
	I	II	III	I	II	III
1	39,41	32,02	27,82	36,65	36,49	29,00
2	33,79	33,64	28,55	39,05	34,41	28,42
3	42,37	33,81	27,24	39,12	29,78	28,52
4	39,13	30,6	28,88	38,00	34,05	28,86
5	35,3	35,34	29,43	35,57	33,36	27,55

Fonte: Da Autora (2025).

A quantificação dos fármacos seguiu a metodologia realizada por Oliveira *et al.* (2020), conforme descrito na sequência.

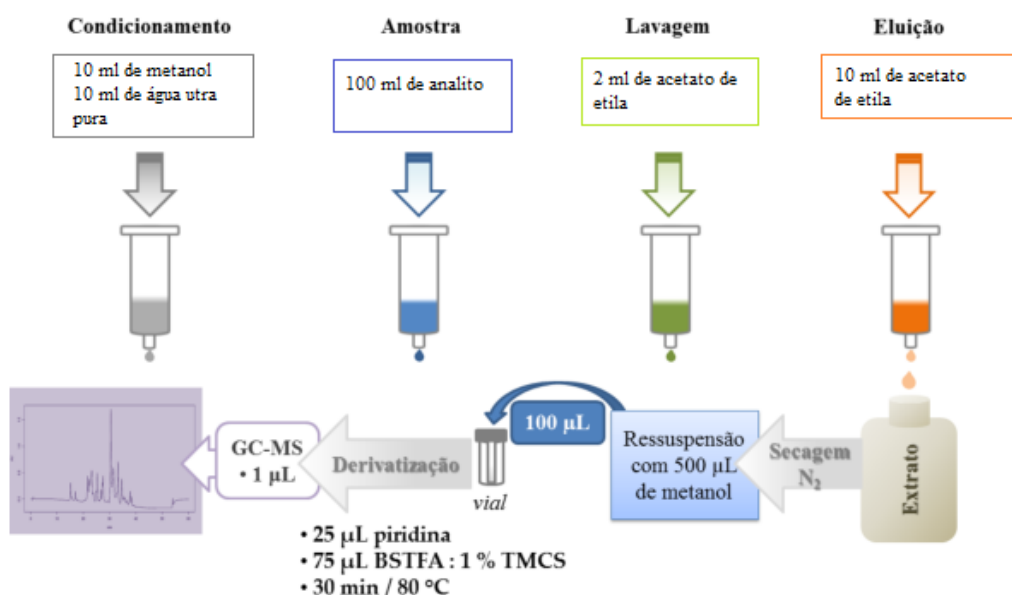
Após a etapa de sorção, o sobrenadante foi filtrado, sequencialmente, em papel de celulose de 3 µm (80 g m⁻² e 33 cm da Nalgon[®]), papel filtro microfibras de borossilicato 0,47 µm (53 g m⁻² da Whatman[®]) e filtro de seringa em H-PTFE (politetrafluoroetileno hidrofílica) de 0,2 µm (4,08 cm² e modelo Millex-Merck[®]). O procedimento de retenção dos analitos de

interesse foi realizado por extração em fase sólida (SPE) em cartuchos Strata SAX – 500 mg mL⁻¹ de trimetilaminopropilsilano (Phenomenex[®]) condicionados com 10 mL de metanol (grau HPLC ≥ 99,9%, Sigma-Aldrich) e 10 mL de água ultrapura produzida em um sistema Millipore Milli-Q, como recomendado por Queiroz (2014). Em seguida, 100 mL de cada amostra filtrada foi inserida no cartucho e realizada a primeira etapa da extração (retenção dos analitos), mantendo-se um fluxo médio de 5,0 mL min⁻¹, exercido por pressão positiva com nitrogênio gasoso (Sanson *et al.*, 2014).

Após passagem e posterior secagem do cartucho, a segunda etapa da extração (remoção dos analitos da coluna) foi realizada com eluição de 10 mL de acetato de etila (grau HPLC ≥ 99,8%, Sigma-Aldrich[®]) em um sistema de extração manifold de baixo custo e bomba a vácuo de 1/4 CV e 2,2 m³ h⁻¹ (Primatec[®], SP, Brasil Brasil). Posteriormente foram secas em fluxo de nitrogênio e encaminhadas para derivatização com piridina e BSTFA - 1% TMCS (N,O-Bis-trimetilsilil trifluoroacetamida, Sigma-Aldrich[®]) (figura 4) e posteriormente submetidas a análise por cromatografia gasosa e espectrometria de massas (GCMS-QP2010 Plus - Shimadzu[®]) o laboratório multiusuário Central de Análise e Prospecção Química (CAPQ), do Departamento de Química da UFLA. Os cálculos de efeito matriz foram realizados segundo a metodologia validada por Sanson (2012).

Foi determinado o valor do pH das soluções-padrão de ibuprofeno e naproxeno, das mídias reativas em água e com as soluções-padrão. Aferiu-se o pH das amostras após 40 minutos de agitação seguidos 15 minutos de repouso (Silva, 2009).

Figura 2: Figura ilustrativa do procedimento de condicionamento e preparo das amostras para quantificação dos fármacos por cromatografia gasosa e espectrometria de massas.



Fonte: Adaptado de Sanson *et al.* (2012).

2.3 Ensaios de adsorção em esgoto sanitário fortificado com fármaco

Após a etapa de ensaios em solução aquosa, foram conduzidos experimentos adicionais utilizando esgoto sanitário tratado na ETE-UFLA. A ETE-UFLA possui sistema de tratamento preliminar, secundário e terciário, conforme descrito em Fialho (2019). A partir do esgoto tratado na ETE/UFLA foram preparadas duas soluções de esgoto uma com ibuprofeno (> 98%; Sigma-Aldrich®) e outra com naproxeno (> 99,9%; Sigma-Aldrich®), na concentração de 3 mg L⁻¹. Ainda, foi realizado ensaio apenas com efluente tratado, com intuito de avaliar a capacidade adsortiva das mídias em condições reais.

De forma independente para cada solução e para cada mídia reativa, procedeu-se ao ensaio de adsorção. Duas unidades de cada mídia reativa de massa, conforme as Tabelas 6, foram inseridas em um erlenmeyer de 250 mL, no qual foi adicionado 100 mL de cada solução: ibuprofeno com esgoto e naproxeno com esgoto. Os erlenmeyers, foram inseridos na mesa agitadora com controle de temperatura por 40 minutos, a 25°C e rotação de 80 rpm. O procedimento foi repetido para avaliação da adição apenas com esgoto tratado. Foram utilizadas apenas as mídias reativas do ensaio II (CCa25Z25) com peso de 32,46 g e 37,18 g.

Tabela 6. Peso das mídias utilizadas nos ensaios de adsorção da amostra de esgoto sanitário tratado fortificado com fármacos.

Ensaio	Ibuprofeno		Naproxeno	
	Peso das mídias (g)		Peso das mídias (g)	
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 1	Repetição 2
CCa0Z50	31,20	34,92	38,57	39,10
CCa25Z25	36,81	34,73	34,98	33,16
CCa50Z0	35,78	30,51	28,81	27,57

Fonte: Da autora (2026).

A quantificação dos fármacos seguiu a metodologia descrita no item 2.2.

2.4 Análise dos resultados

Os dados experimentais obtidos nos ensaios em batelada foram utilizados para o cálculo da quantidade adsorvida no equilíbrio (Q_e), expressa em mg g^{-1} , a partir da Equação 1:

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_{eq})V}{m} \quad (1)$$

em que, C_0 é a concentração inicial do adsorbato (mg L^{-1}), C_e é a concentração no equilíbrio (mg L^{-1}), V é o volume da solução (L) e m é a massa do adsorvente (g).

A modelagem do processo de adsorção foi realizada por meio da aplicação dos modelos isotérmicos de cinética de Langmuir (Equação 2) e Freundlich (Equação 3), amplamente utilizados para descrever o comportamento de adsorção de contaminantes orgânicos em sistemas sólido-líquido. (Langmuir, 1918; Freundlich, 1906; Tran *et al.*, 2017).

$$S = \frac{q_{\text{máx}} K_L C_{eq}}{1 + C_{eq} K_L} \quad (2)$$

$$S = K_F C_{eq}^{1/n} \quad (3)$$

em que: S - Quantidade de adsorbato adsorvida na fase sólida (mg g^{-1}); C_{eq} - concentração do adsorbato no equilíbrio (mg L^{-1}); K_L - constante de Langmuir (L g^{-1}); K_F - constante de capacidade de adsorção de Freundlich ($\text{mg}^{1-(1/n)} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$); $1/n$ - constante relacionada à heterogeneidade da superfície.

A adequação dos modelos de Langmuir e Freundlich aos dados experimentais foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), permitindo comparar o comportamento adsorptivo das diferentes mídias reativas desenvolvidas para a remoção de ibuprofeno e naproxeno.

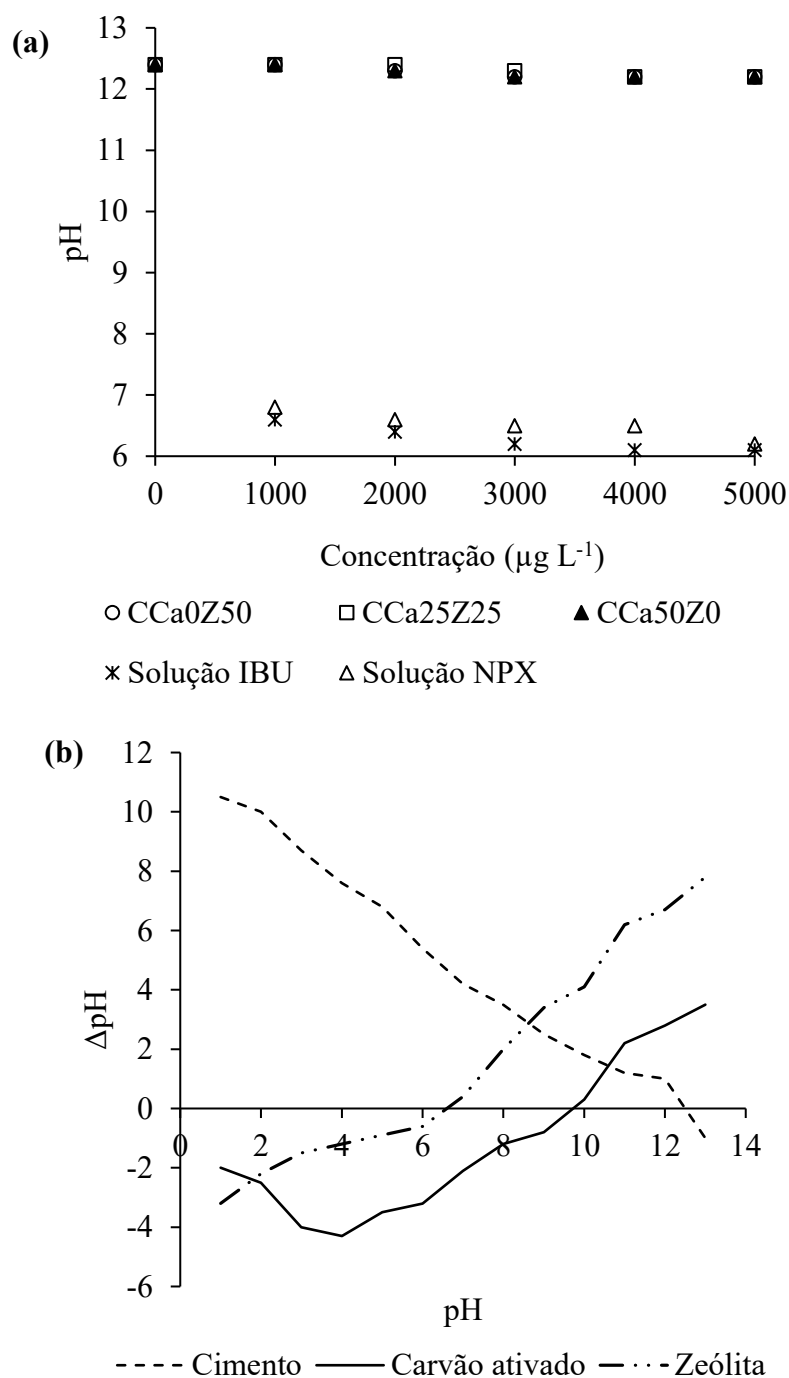
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Eficiência de adsorção do ibuprofeno e naproxeno em solução aquosa

Os valores de pH em água do cimento, do carvão ativado e da zeólita foram 12,6, 9,8 e 8,0, respectivamente, e estão relacionados com a composição apresentada na Tabela 1, e em conformidade com os valores observados na literatura de 12,5 para o cimento (Kuhn *et al.*, 2024), e de 7,6 para a zeólita (Arenhardt *et al.*, 2025). Mas acima do valor de pH de 6,9 reportado para carvão ativado de casca de coco (Piriya *et al.*, 2021), devido, provavelmente, a maior heterogeneidade do material utilizado na confecção do carvão.

Na Figura 3 estão apresentadas as curvas observadas para a determinação do pH_{PCZ} . O pH_{PCZ} foi de 12,5, 9,6 e 6,5 para o cimento, carvão ativado e zeólita. A superfície do adsorvente é carregada positivamente quando $pH < pH_{PCZ}$ e negativamente quando $pH > pH_{PCZ}$, dificultando a adsorção do ibuprofeno. O ibuprofeno é um ácido fraco, e são moléculas neutras com pH abaixo do pK_a , e interagem com a superfície adsorptiva por meio de interação não eletrostática, envolvendo ligações de hidrogênio (Pooja *et al.*, 2024).

Figura 3. Curvas de pH das mídias reativas em água ($0 \mu\text{g L}^{-1}$), das mídias reativas em solução após os ensaios de sorção (1000 a $5000 \mu\text{g L}^{-1}$), e das soluções puras de ibuprofeno e naproxeno (a); e curvas de pH para determinação do pH_{PCZ} (b).



Fonte: Da Autora (2026).

A eficiência de adsorção do ibuprofeno foi avaliada para três diferentes composições de mídias reativas, considerando concentrações iniciais (C_0) variando de 1, 2, 3, 4 e $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. As concentrações finais (C_f) estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Concentrações iniciais (C_0), finais (C_f), eficiência de remoção (E) e massa adsorvida (M_A) médias de ibuprofeno e naproxeno, em solução aquosa, pelas diferentes mídias reativas.

Ensaio	Ibuprofeno				Naproxeno			
	C_0	C_f	E	M_A	C_0	C_f	E	M_A
	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(%)	(mg g ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(%)	(mg g ⁻¹)
Ensaio I CCa0Z50	1	0,095	90,5	0,027	1	0,246	75,4	0,020
	2	0,090	95,5	0,048	2	0,242	87,9	0,049
	3	0,138	95,4	0,073	3	0,413	86,2	0,064
	4	0,116	97,1	0,104	4	0,427	89,3	0,093
	5	0,129	97,4	0,127	5	0,414	91,7	0,129
Ensaio II CCa25Z25	1	0,072	92,8	0,026	1	0,227	77,3	0,023
	2	0,075	96,2	0,050	2	0,268	86,6	0,051
	3	0,150	95,0	0,079	3	0,391	87,0	0,082
	4	0,113	97,2	0,110	4	0,421	89,5	0,111
	5	0,143	97,1	0,131	5	0,425	91,5	0,133
Ensaio III CCa50Z0	1	0,072	92,8	0,031	1	0,286	71,4	0,025
	2	0,087	95,6	0,065	2	0,261	86,9	0,061
	3	0,087	97,1	0,098	3	0,374	87,5	0,094
	4	0,092	97,7	0,134	4	0,392	90,2	0,125
	5	0,101	98,0	0,159	5	0,406	91,9	0,161

Fonte: Da Autora (2026).

Para os ensaios com o ibuprofeno, em média, as eficiências de remoção foram superiores a 90%, independente da composição da mídia reativa, e da concentração inicial do fármaco, indicando boa capacidade adsorvativa dos diferentes materiais. Na Figura 4a é possível observar o aumento da concentração inicial o que ocorre devido a força impulsora necessária para superar a resistência à transferência de massa entre a fase líquida e a fase sólida, favorecendo a difusão dos fármacos para os sítios ativos, ou seja, o aumento da concentração inicial do adsorvato devido à transferência de massa inicial, o que aumenta as colisões entre o adsorvente e o adsorvato até que o ponto de saturação seja atingido. Esse aumento demonstra que ibuprofeno

e o naproxeno superaram a resistência à transferência de massa, devido ao maior gradiente de concentração (Sevim *et al.*, 2025).

Em estudos realizados com zeólitas natural (diâmetro < 5 mm), Karthik e Philip (2021) obtiveram entre 0,73 e 1,32 mg g⁻¹ de remoção de ibuprofeno. O ensaio utilizou concentrações de 1 a 10 mg L⁻¹ do fármaco e os valores adsorvidos foram mais próximos ao observado no presente trabalho. Bello *et al.* (2020) avaliou a remoção de ibuprofeno em carvão ativado a base de casca de coco e verificaram remoção de até 76 mg g⁻¹. Entre a zeólita natural e o carvão ativado, a literatura apresenta com maior potencial de sorção de ibuprofeno o carvão ativado, independentemente de sua origem com valores entre 0,47 e 150 mg g⁻¹ (Mabalane; Thabede; Shooto, 2024). Normalmente, as zeólitas modificadas apresentam maior capacidade adsorviva comparada à zeólita natural (Karthik; Philip, 2021). Al-rimawi *et al.* (2019) demonstraram que, quando a concentração inicial do ibuprofeno aumentou de 10 para 50 mg L⁻¹, a capacidade de remoção da zeólita natural aumentou de 0,04 para 2,0 mg g⁻¹, valores mais próximos ao do presente trabalho.

Abu Sharib *et al.* (2024) observaram valor de adsorção de ibuprofeno superior ao do presente trabalho. Os autores verificaram capacidades máximas variando de 40,0 a 52,3 mg g⁻¹, ao utilizaram calcário preto ativado com silicato de sódio, o que resultou em um produto adsorvente rico em calcita e silicato de cálcio, semelhante ao cimento utilizado no presente trabalho. Entretanto, os autores trabalharam com granulometrias menor (<0,1 mm), maior tempo de contato (180 min) e maiores concentrações de ibuprofeno em solução (20 a 140 mg L⁻¹), o que resultou, provavelmente, em maior área superficial e maior massa adsorvida por unidade de adsorvente.

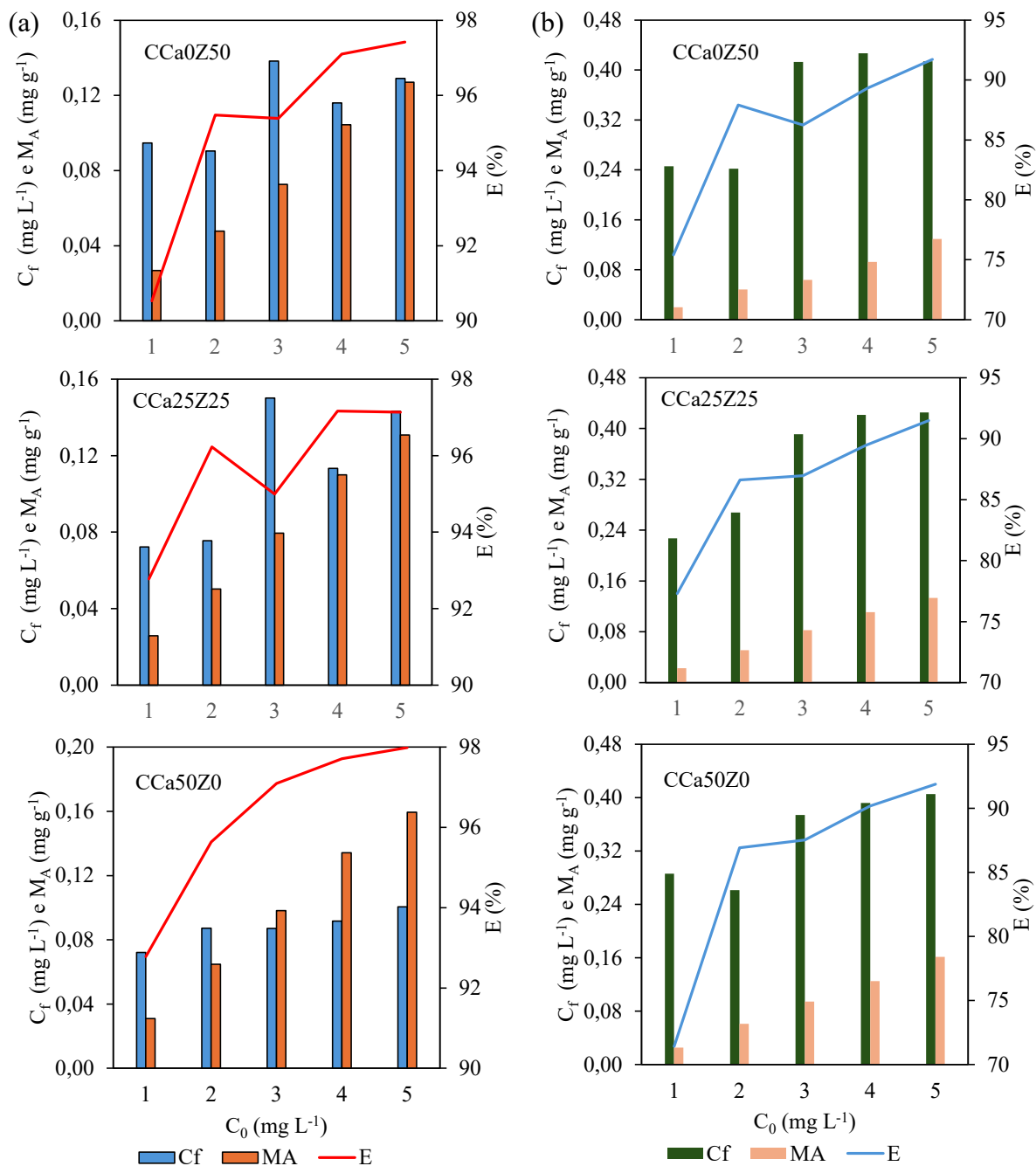
Karthik e Philip (2021) promoveram a adsorção de ibuprofeno em blocos de concreto celular autoclavado triturados (<5 mm) e obtiveram adsorção de 6,61 mg g⁻¹ h⁻¹. Os autores atribuíram as maiores eficiências de remoção entre 60 e 68% à maior área superficial e ao volume de poros relativamente maiores, bem como à presença de grupos hidroxila (ligações de hidrogênio) e grupos hidrato de silicato de cálcio (interação eletrostática), comparado às demais materiais estudados, como: fragmentos de tijolo (24 a 36%) e areia (27 a 38%). A presença de uma quantidade maior de cátions, principalmente cálcio presente nos compostos cimentícios, como observado no presente estudo, promove maior interação eletrostática com os poluentes alvo (Al-rimawi *et al.*, 2019). Fosca *et al.* (2022) trabalharam com compostos cimentícios a base de fosfato de cálcio, e verificaram que a análise FTIR revelou uma alta concentração de grupos SiOH ao longo das paredes dos poros, composto formado com a hidratação do cimento, e os grupos OH⁻ e COO⁻ do ibuprofeno podem interagir com o SiOH por meio de ligações de

hidrogênio. Além disso, o grupo carboxila do ibuprofeno pode interagir com o Ca^{2+} presente no cimento (Tabela 2). Os autores sugeriram que esses fatores podem causar a sorção do ibuprofeno.

Durante o processo de hidratação, o cimento libera Ca(OH)_2 , elevando o pH da solução para valores em torno de 12 a 13,8 (Yousuf *et al.*, 2020). A constante de dissociação (pK_a) do ibuprofeno é de 4,9 (20 °C) (Pooja *et al.*, 2024). Portanto, a proporção de ibuprofeno aniônico aumenta com o aumento do pH da solução, e o ibuprofeno desprotonado apresenta taxas de reação mais elevadas (Asghar *et al.*, 2022). Esta pode ser outra razão para a maior eficiência de remoção do ibuprofeno em condições alcalinas. O que diverge dos achados de Thabede (2024) que avaliou a adsorção de ibuprofeno em sabugo de milho ativado quimicamente com ácido nítrico, e verificou que a adsorção aumentou até pH 6,0 (36,81 mg g^{-1}), e decresceu até pH 10, último valor pesquisado.

A remoção de naproxeno foi elevada, acima de 70% para todos os ensaios, alcançando 92%. Apesar do bom desempenho das mídias para remoção de naproxeno os valores foram inferiores aos observados para o ibuprofeno. Observou-se ainda tendência de menor massa adsorvida de naproxeno para as menores concentrações de fármaco aplicadas, quando comparada ao ibuprofeno. Porém, para as maiores concentrações as massas adsorvidas foram equivalentes. Na Figura 4b é possível observar tendência de aumento da eficiência de remoção de naproxeno com o aumento da concentração inicial aplicada nos ensaios.

Figura 4: Variação da concentração final (C_f), da massa adsorvida (M_A) e da eficiência de remoção (E) para as diferentes mídias reativas nos ensaios com ibuprofeno (a) e naproxeno (b).



Fonte: Da Autora (2026).

Lach e Szymonik (2019) avaliaram a adsorção de naproxeno em diferentes carvões ativados comerciais e verificaram adsorções entre 53,4 e 83,3 mg g⁻¹, sendo o menor valor observado para o maior valor de pH (10). A faixa de valores obtidos é superior à do presente trabalho. Sabidamente, carvões ativados apresentam elevada capacidade de adsorção de

fármacos, entretanto, por estar inserido na mídia reativa, provavelmente, houve redução da capacidade adsorviva.

Smiljanić *et al.* (2021) modificaram duas zeólitas naturais, incluindo clinoptilolita e filipsita, com cloreto de cetilpiridínio e surfactantes Arquad® 2HT-75 para remover os contaminantes emergentes ibuprofeno e naproxeno da água. A capacidade máxima de adsorção em monocamada foi estimada em 19,7 mg g⁻¹ e 16,1 mg g⁻¹ para o ibuprofeno e o naproxeno, respectivamente. Entretanto, Ortiz, García e Serrano (2026) avaliaram a adsorção de naproxeno em colunas estáticas com zeólita natural que apresentou capacidade de sorção insignificante para o fármaco.

Com base nos resultados obtidos para os fármacos ibuprofeno e naproxeno verificou-se diferenças no comportamento adsorvivo em função tanto da natureza do analito quanto da composição das mídias reativas avaliadas. De modo geral, ambos os fármacos apresentaram elevadas eficiências de remoção, variando predominantemente entre 71% e 98%.

Para o ibuprofeno, observou-se desempenho superior e mais homogêneo em comparação ao naproxeno. Embora o naproxeno também tenham apresentado bons níveis de eficiência, verificou-se maior variabilidade nos valores de remoção, principalmente nas menores concentrações iniciais. As eficiências observadas variaram entre 71% e 92%, dependendo da composição da mídia e da etapa experimental, sugerindo comportamento adsorvivo mais sensível às condições do sistema quando comparado ao ibuprofeno.

As diferenças observadas entre os níveis de eficiência de remoção do ibuprofeno e do naproxeno podem ser atribuídas às estruturas moleculares de ambos os compostos, como a distribuição de grupos funcionais capazes de interagir com superfícies adsorventes. Em adsorbentes mesoporosos, compostos com grupos aromáticos e carboxila, como o ibuprofeno, podem estabelecer interações π - π e ligações por forças de dispersão com superfícies carbonáceas e materiais porosos, favorecendo a adsorção (Liu *et al.*, 2019). Esses mecanismos aumentam a afinidade do fármaco pela superfície do adsorbente e contribuem para maior eficiência de remoção.

Ainda, a composição das mídias avaliadas pode influenciar de maneira distinta a remoção dos dois fármacos. A presença do carvão ativado na superfície da mídia tende a potencializar a adsorção de fármacos em solução aquosa devido à sua elevada área superficial e à diversidade de sítios ativos disponíveis para interação com as moléculas do contaminante (Zhang *et al.*, 2020). Por outro lado, a zeólita e a fase cimentícia podem contribuir via intercâmbio iônico, interação eletrostática e efeitos de superfície que modulam a interação com as espécies adsorvidas (Silva *et al.*, 2021).

No caso do naproxeno, as eficiências um pouco mais baixas podem ser justificadas pela menor afinidade por alguns sítios adsorventes ou maior sensibilidade às propriedades da matriz cimentícia (García *et al.*, 2022). Essa variação pode ser explicada pelas propriedades físico-químicas específicas do naproxeno, como maior massa molecular, maior hidrofobicidade e presença de um grupo metoxi adicional em sua estrutura aromática, características que podem influenciar tanto a difusão do fármaco até os poros do adsorvente quanto o tipo de interação predominante na superfície, favorecendo mecanismos como interações π - π e forças hidrofóbicas, mas também impondo limitações difusionais em materiais com porosidade menos acessível (Zhang *et al.*, 2020).

O carvão ativado contribui com elevada área superficial e sítios hidrofóbicos, enquanto a zeólita pode atuar por meio de interações eletrostáticas e troca iônica, especialmente quando o naproxeno se encontra na forma ionizada. Esse comportamento está de acordo com resultados reportados por García-Martínez *et al.* (2022), que observaram maior remoção de naproxeno em adsorventes híbridos em comparação a materiais monocomponentes.

Eficiências menores de remoção podem estar associadas à imobilização parcial dos sítios ativos do carvão pela matriz cimentícia, o que reduz a acessibilidade dos fármacos às superfícies adsorventes mais energéticas. Embora matrizes cimentícias aumentem a estabilidade mecânica do material, elas podem comprometer a cinética de adsorção de fármacos mais volumosos, como o naproxeno, se não houver adequada exposição dos poros ativos (Silva *et al.*, 2021). Além disso, em função da maior sensibilidade às condições do meio, como pH e força iônica, o naproxeno tende a permanecer na forma aniônica, o que pode reduzir sua afinidade por superfícies igualmente carregadas negativamente (Kumar; Singh, 2023).

Difícilmente, serão encontrados na literatura materiais equiparáveis à mistura de materiais utilizados no presente trabalho, bem como a granulometria utilizada, tendo em vista o objetivo principal do presente trabalho, a confecção e avaliação de mídias reativas. Além disso, os resultados da presente pesquisa são uma indicação da eficiência das mídias reativas dos processos de sorção, tornando-as promissoras na remoção de fármacos de afluentes tratados, visto que consistiu em estudos de sorção com concentrações de fármacos muito superiores às observadas em águas residuárias não tratadas ou tratadas.

Embora tenham sido obtidas eficiências relevantes de remoção de ibuprofeno e naproxeno, destaca-se a necessidade de compreender o processo de adsorção de forma mais aprofundada, ressaltando a importância de aplicação de métodos que expliquem o comportamento dos compósitos para as diferentes concentrações de fármacos. Para isto, buscou-se empregar os resultados obtidos em modelos isotérmicos de adsorção, mencionados

na metodologia. No entanto, constatou-se a inadequação dos dados experimentais aos modelos.

Em um estudo de adsorção realizado por Myers, Cabrera-Codony e Valverde (2023), foi verificada falha na adequação dos dados experimentais a diversos modelos de isoterma testados, alegando o ocorrido em virtude de diferentes mecanismos atuantes em materiais adsortivos, no qual podem demonstrar incapacidade de representar com precisão os dados experimentais, pois em geral, os modelos de adsorção são regidos por intervalos de aplicabilidade.

Nesta perspectiva, pressupõe-se que a não adaptação aos modelos isotérmicos pode ser explicada ao considerar os compósitos com geometria semelhante a um tronco de pirâmide foram empregados inteiros nesta fase do processo, podendo ter propiciado área adsortiva reduzida. Além do formato, o tamanho das partículas pode explicar a não adequação dos modelos, como estudado por Valverde *et al.* (2024).

No entanto, embora não tenha ocorrido a adaptação aos modelos de isothermas, o processo adsortivo apresentou considerável redução dos fármacos estudados, como verificado nos resultados da condição de equilíbrio e eficiência, em que para todos os tratamentos houve remoção superior a 75% das concentrações que foram elevadas quando comparadas àquelas observadas em efluentes sanitários. Deste modo, pressupõe-se que os resultados da considerável redução de fármacos em todos os tratamentos, embora não adaptáveis aos modelos de isothermas, estiveram associados à interação dos íons com os componentes químicos do cimento bem como do carvão ativado e da zeólita, em que pelo desgaste do compósito na etapa de agitação, pode ter promovido interação favorável para a efetividade do processo adsortivo.

3.2 Eficiência de adsorção do ibuprofeno e naproxeno do esgoto sanitário

A eficiência de adsorção do ibuprofeno e naproxeno adicionados ao esgoto foi avaliada para as três diferentes composições de mídias reativas, considerando a concentração inicial de 3 mg L⁻¹ e 9,61 mg L⁻¹, respectivamente, e os resultados estão apresentados na Tabela 8 e Figura 5.

Tabela 8. Concentrações iniciais (C_0), finais (C_f), eficiência de remoção (E) e massa adsorvida (M_A) médias de ibuprofeno e naproxeno, adicionados ao esgoto sanitário tratado, pelas diferentes mídias reativas.

Fármacos	Ensaio	C_0 (mg L ⁻¹)	C_f (mg L ⁻¹)	E (%)	M_A (mg g ⁻¹)
IBU	CCa0Z50	3,48	0,37	89	0,094
	CCa25Z25	3,48	0,24	93	0,091
	CCa50Z0	3,48	0,30	91	0,097
NPX	CCa0Z50	9,61	1,35	86	0,213
	CCa25Z25	9,61	0,73	92	0,261
	CCa50Z0	9,61	1,04	89	0,304

Fonte: Da autora 2026.

Os ensaios de adsorção realizados com efluente tratado fortificado com ibuprofeno e naproxeno demonstraram elevada eficiência de remoção para todas as mídias reativas avaliadas. A concentração inicial média de ibuprofeno foi de 3,48 mg·L⁻¹, enquanto as concentrações finais variaram entre 0,24 e 0,37 mg·L⁻¹, resultando em eficiências de remoção entre 89% e 93%. Mesmo em maior concentração inicial de naproxeno (9,61 mg L⁻¹), as eficiências foram mantidas elevadas (86 a 92%). Apesar de as maiores eficiências terem sido observadas para a mídia CCa25Z25, a mídia CCa50Z0 foi a que apresentou maior massa de fármaco adsorvida por massa de adsorvente. Provavelmente, a maior eficiência observada para a mídia CCa50Z0 está associada à maior proporção de carvão ativado presente em sua composição, uma vez que esse material apresenta elevada área superficial específica, maior volume de poros e ampla disponibilidade de sítios ativos para adsorção, favorecendo a interação com compostos orgânicos (Grela; Kuc; Bajda, 2021; Susilawati *et al.*, 2022).

Além disso, esse comportamento pode estar associado a uma maior contribuição de interações hidrofóbicas e ligações π - π entre os anéis aromáticos do naproxeno e a superfície carbonácea do adsorvente, bem como à sinergia entre os componentes da mídia, que pode incrementar a disponibilização de sítios energéticos de adsorção (Zhang; Geiben; Gal, 2021). Outro fator está relacionado à ocorrência de diferenciais na textura superficial e na distribuição de poros que pode favorecer a difusão de moléculas mais volumosas como o naproxeno, especialmente em mídias que incluem carvão ativado em maiores proporções (Lima *et al.*, 2021). Ainda, a maior concentração de naproxeno pode ter influenciado a maior massa adsorvida, comparada à massa de ibuprofeno, tal como verificado por Nodeh *et al.* (2021).

A adsorção de fármacos em matrizes complexas é influenciada por múltiplos fatores, incluindo disponibilidade de sítios ativos, características de superfície dos adsorventes e a natureza físico-química da matriz (He *et al.*, 2022). Nesse sentido, a variação das massas adsorvidas pode refletir a influência competitiva de compostos, o que reduz a disponibilidade de sítios adsorptivos para os fármacos.

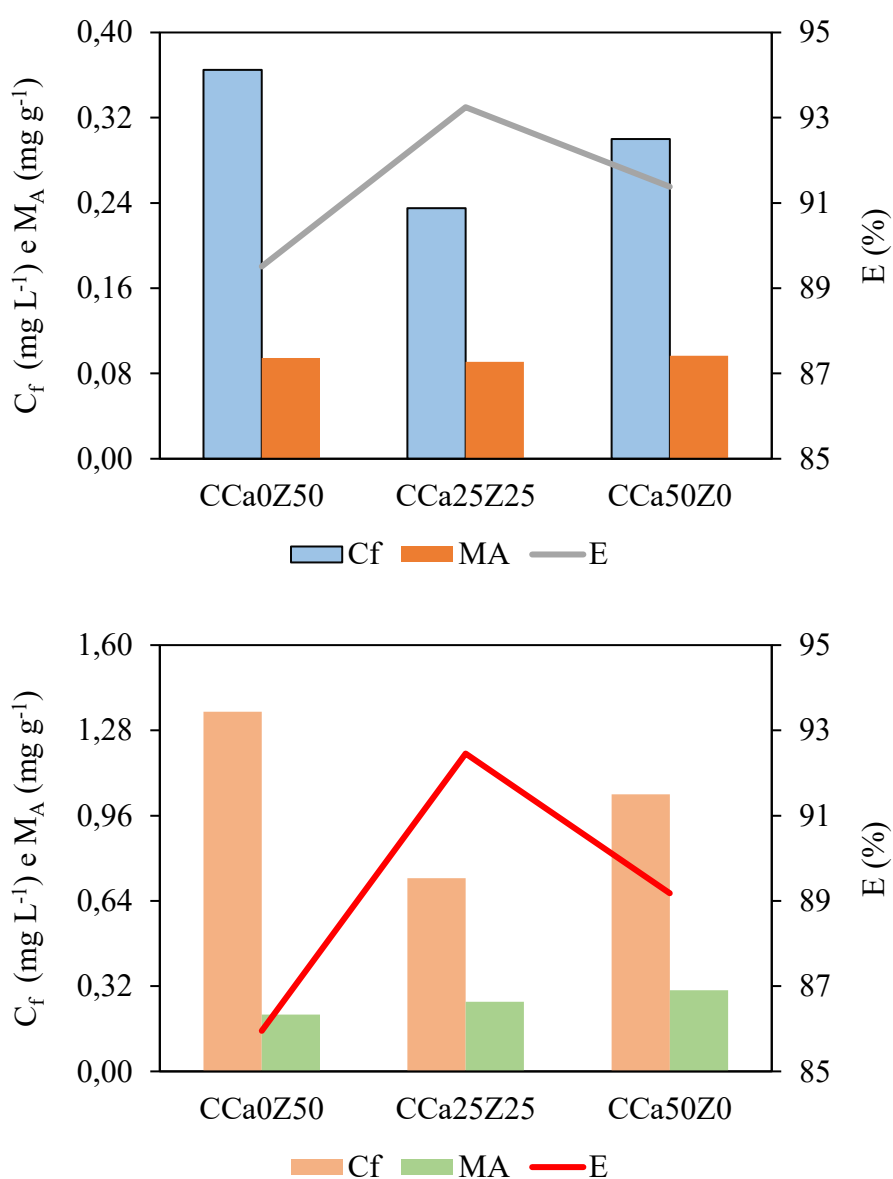
As elevadas eficiências mesmo nos ensaios com efluente tratado comparados com os ensaios com a solução aquosa, indicam que as mídias reativas apresentaram uma boa capacidade adsorptiva, capazes de lidar com fatores adversos como matéria orgânica dissolvida e íons competidores por sítios de adsorção. Esta observação é consistente com evidências da literatura, que apontam que a adsorção em materiais de elevada área superficial e porosidade, como carvão ativado, é uma das estratégias mais eficazes para a remoção de fármacos em efluentes (Siyal *et al.*, 2025; Zhai *et al.*, 2024).

Comparativamente, os valores de remoção observados neste estudo situam-se na mesma faixa ou acima daqueles reportados em trabalhos recentes com matrizes reais. Estudos como o de Siyal *et al.* (2025) demonstraram faixas de eficiência entre 85% e 95% para adsorção de ibuprofeno em águas residuárias utilizando carvões ativados otimizados, mesmo sem ajustes prévios da solução experimental. De maneira semelhante, Zhai *et al.* (2024) relataram eficiências de 80% a 90% em efluentes sanitários tratados com carvão ativado comercial em concentrações iniciais comparáveis, destacando a influência do contexto de matriz na eficiência final de adsorção.

Os elevados percentuais de remoção dos fármacos observados nos ensaios com efluente tratado demonstram a adsorção como uma estratégia eficaz para mitigar contaminantes emergentes em águas influenciadas por efluentes sanitários. Os carvões ativados possuem elevada área superficial e estrutura microporosa, características que favorecem a retenção de fármacos como ibuprofeno e naproxeno, mesmo em matrizes complexas contendo matéria orgânica e outros solutos competidores (Siyal *et al.*, 2025).

Estas comparações indicam que os resultados obtidos com as mídias reativas desenvolvidas neste trabalho são compatíveis com estudos já realizados sobre a adsorção de ibuprofeno. Ademais, a literatura também aborda adsorventes alternativos, como biocarvão, que apresentaram elevados percentuais de remoção de fármacos em matrizes complexas, reforçando que a modulação das propriedades físico-químicas do adsorvente é determinante para a capacidade de remoção (Ahmad *et al.*, 2023; Vila *et al.*, 2023).

Figura 5. Variação da concentração final (Cf), da massa adsorvida (MA) e da eficiência de remoção (E) para as diferentes mídias reativas nos ensaios com ibuprofeno e naproxeno.



Fonte: Da autora (2026).

Foram realizadas duas amostragens independentes de esgoto sanitário tratado, sem adição externa de fármacos, com o objetivo de avaliar a presença de ibuprofeno e naproxeno. As análises indicaram a presença de ambos os compostos nas amostras, confirmando a persistência desses fármacos após o tratamento biológico convencional. Em média foram observadas concentrações de 0,241 e 0,452 mg L⁻¹ (Tabela 9).

Tabela 9. Concentrações iniciais (C_0), finais (C_f), eficiência de remoção (E) e massa adsorvida (M_A) médias de ibuprofeno e naproxeno presentes no esgoto sanitário tratado, pela mídia reativa CCa25Z25.

Fármacos	C_0 (mg L ⁻¹)	C_f (mg L ⁻¹)	E (%)	M_A (mg g ⁻¹)
IBU	0,241	0,059	75	0,006
NPX	0,452	0,095	79	0,010

Fonte: Da autora (2026).

Os valores observados reforçam os relatos de Wojcieszynska e Guzik (2020), que em estações de tratamento de esgoto, o naproxeno não sofre mineralização completa e, apesar de um grau relativamente alto de transformação, é liberado no meio ambiente juntamente com o efluente da estação de tratamento. Os autores ainda relatam que a remoção do naproxeno em estações de tratamento de águas residuárias apresenta variações significativas, desde a remoção quase completa até um nível de degradação de apenas 40%, e pode variar de 25 ng L⁻¹ a 33,9 µg L⁻¹. Valores inferiores aos observados na presente pesquisa, provavelmente por se tratar de esgoto sanitário e menos diluído que os efluentes domésticos.

Verificou-se que, após o tratamento com a mídia reativa, as concentrações de ibuprofeno foram reduzidas para valores entre 0,058 e 0,066 mg·L⁻¹, correspondendo a uma eficiência média de 83%. Para o naproxeno, as concentrações finais variaram entre 0,093 e 0,098 mg·L⁻¹, resultando em eficiências de remoção entre 79% e 81%. O que demonstra que a mídia reativa com quantidades equivalentes de carvão ativado e zeólitas (CCa25Z25) foi capaz de promover remoção significativa de ibuprofeno e naproxeno em esgoto tratado, uma solução complexa composta por matéria orgânica dissolvida, sólidos coloidais, sais e outros micropoluentes que podem competir por sítios ativos de adsorção.

Entretanto, a menor concentração inicial dos fármacos no esgoto tratado proporcionou uma menor massa adsorvida quando comparada aos ensaios em que foram adicionados fármacos ao esgoto. Assim, a competição dos diferentes íons presentes no esgoto pelos sítios adsorptivos da mídia reativa e a menor força iônica proporcionada pela menor concentração dos fármacos influenciaram diretamente na massa adsorvida.

Zhang *et al.* (2018) realizaram estudos em lote utilizando zeólita com granulometria natural ($d_{10} = 1,38$ mm e $d_{60} = 2,46$ mm) em colunas à temperatura ambiente e foram alimentadas com efluente tratado de suinocultura, no qual foram adicionados 100 µg L⁻¹ de ibuprofeno. Os autores observaram reduzida adsorção do fármaco, da ordem de 78 µg g⁻¹. Hernandez *et al.* (2024) também observaram reduzida remoção de ibuprofeno (40 µg L⁻¹) ao

utilizarem 5 g L⁻¹ de zeólita natural em um reator para tratamento de efluente sintético com até 2000 µg L⁻¹ do fármaco. Os autores verificaram que a remoção ocorreu principalmente por biorreação, sem sorção na biomassa e com baixa sorção na superfície da zeólita. Os fenômenos de sorção foram negligenciáveis e a remoção pôde ser atribuída principalmente à atividade biológica.

Silva *et al.* (2024) estudaram materiais à base de argila e cimento para a remoção de estrona, estradiol e etinilestradiol (50 µg L⁻¹) adicionados em esgoto sintético. Os autores verificaram remoções entre 50 e 93%. Os resultados sugerem que o compósito obtido pela ativação química de concreto celular autoclavado com cimento branco foi o material mais adequado para remoção simultânea dos desreguladores endócrinos em wetlands verticais nas condições operacionais avaliadas.

Marcelino *et al.* (2020) avaliaram como material suporte de wetlands construídos de escoamento vertical agregados de argila expandida leve, argila expandida com ladrilhos de porcelanato e tijolos e verificaram que a argila expandida proporcionou a maior remoção de ibuprofeno (6 mg L⁻¹) do esgoto sintético (92%) comparado aos demais sistemas, provavelmente pela combinação de biodegradação e sorção.

As eficiências de remoção de fármacos por adsorção tendem a ser menores em matrizes reais, como o esgoto do que em soluções sintéticas devido à competição por sítios de adsorção (Zhai *et al.*, 2024). Mesmo assim, percentuais superiores a 70% são considerados elevados para sistemas complexos, o que corrobora os valores obtidos neste estudo para naproxeno (79–81%) e ibuprofeno (83%).

Em síntese, a capacidade de remover ibuprofeno e naproxeno em efluentes tratados confirma que a adsorção com mídias reativas constitui uma tecnologia complementar eficaz ao tratamento biológico (He *et al.*, 2022; Siyal *et al.*, 2025). Mustafa *et al.* (2022) e Liu *et al.* (2024), em uma pesquisa, com uso de biocarvão e nanocompósitos carbonáceos, como adsorvente observaram que boas faixas de remoção, observando que os níveis de eficiência de remoção podem variar de acordo com o analito.

A utilização de efluente tratado representa um cenário de maior complexidade química em comparação à solução aquosa sintética, devido à presença de matéria orgânica residual, sólidos dissolvidos, íons e outros micropoluentes que podem competir pelos sítios de adsorção nas superfícies das mídias reativas. Dessa forma, essa etapa permitiu avaliar a robustez do processo adsorativo frente a interferentes típicos de matrizes reais de esgoto tratado.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na presente pesquisa demonstram que as mídias reativas desenvolvidas a partir de cimento, zeólita e carvão ativado apresentam elevado potencial para a remoção de ibuprofeno e naproxeno, tanto em solução aquosa sintética quanto em efluente sanitário tratado. As elevadas eficiências de remoção observadas, frequentemente superiores a 85% e alcançando valores próximos a 95% para algumas formulações, evidenciam a viabilidade técnica do uso dessas mídias como etapa complementar ao tratamento biológico convencional.

A composição das mídias mostrou influência direta no desempenho adsorptivo. De modo geral, as formulações contendo carvão ativado apresentaram os melhores resultados, o que pode ser associado à sua elevada área superficial, porosidade desenvolvida e afinidade por compostos orgânicos hidrofóbicos. A zeólita, por sua vez, contribuiu estruturalmente para a estabilidade da mídia e possivelmente para interações eletrostáticas, enquanto o cimento atuou como agente aglomerante, permitindo a obtenção de um material sólido, manuseável e potencialmente aplicável como meio suporte em sistemas de tratamento.

Os ensaios realizados com efluente tratado demonstraram que as mídias mantiveram desempenho expressivo mesmo em matriz complexa, contendo matéria orgânica dissolvida e outros constituintes que podem competir por sítios de adsorção. Esse comportamento reforça a aplicabilidade prática do material, indicando que sua eficiência não se restringe a condições ideais de laboratório, mas também se estende a cenários mais próximos da realidade operacional de estações de tratamento de esgoto.

Comparativamente aos ensaios realizados com soluções sintéticas, observa-se redução moderada nas eficiências quando a matriz é o esgoto tratado, devido à competição com matéria orgânica natural e outros compostos dissolvidos. Ainda assim, os resultados confirmam que a adsorção se mantém como um mecanismo eficiente mesmo em condições mais próximas da aplicação prática.

Dessa forma, conclui-se que as mídias reativas desenvolvidas constituem uma solução tecnicamente eficiente e ambientalmente relevante para a remoção de ibuprofeno e naproxeno, como uma etapa complementar de tratamento de efluente, a sem adição artificial de contaminantes, evidenciando a relevância ambiental e a aplicabilidade da tecnologia proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABO, L. D. *et al.* Comprehensive review on co-integration of conventional systems and advanced oxidation processes for industrial and agricultural wastewater treatment applications. **Environmental Advances**, v. 20, p. 100638, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2025.100638>.
- AGUIÑAGA-MARTÍNEZ, N. *et al.* Prescription of non-steroidal anti-inflammatory and antirheumatic drugs in outpatient hypertensive patients. **Gaceta Médica de México**, v. 160, n. 2, p. 163–169, 2024. DOI: <https://doi.org/10.24875/GMM.23000382>.
- AHMAD, T. *et al.* Functionalized biochar for the adsorption of pharmaceuticals (including ibuprofen) from wastewater: a comparative study. **Journal of Hazardous Materials**, v. 442, p. 130231, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130231>.
- AHMAD, T. *et al.* Oil palm biomass-based adsorbents for the removal of emerging contaminants from wastewater: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 262, p. 110357, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110357>.
- AL-RIMAWI, F. *et al.* Removal of selected pharmaceuticals from aqueous solutions using natural Jordanian zeolite. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 44, p. 209–215, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3406-9>.
- ARENHARDT, W. D. *et al.* Fe³⁺ and Mn²⁺ removal from water solutions by clinoptilolite zeolites as a potential treatment for groundwater wells. **Processes**, v. 13, p. 1060, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13041060>.
- AUS DER BEEK, T. *et al.* Pharmaceuticals in the environment — global occurrences and perspectives. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 35, n. 4, p. 823–835, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.3339>.
- BADAWY, M. E. I. *et al.* A review of the modern principles and applications of solid-phase extraction techniques in chromatographic analysis. **Analytical Sciences**, v. 38, n. 12, p. 1457–1487, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2116/analsci.22R003>.
- BELLO, O. S. *et al.* Ibuprofen removal using coconut husk activated biomass. **Chemical Data Collections**, v. 29, p. 100533, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2020.100533>.
- BOLONG, N. *et al.* A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. **Desalination**, v. 239, n. 1–3, p. 229–246, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.020>.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Câmara de Regulação do Mercado de Medicamentos (CMED). **Anuário estatístico do mercado farmacêutico – 2024**.

Brasília, DF: ANVISA/CMED, 2025. Disponível em: https://farmacia.saude.pe.gov.br/wp-content/uploads/2025/09/Anuario-Estatistico-do-Mercado-Farmaceutico-2024_compressed-2.pdf. Acesso em: 22 nov. 2025.

CHABER-JARLACHOWICZ, P.; GWOREK, B.; KALINOWSKI, R. Removal efficiency of pharmaceuticals during the wastewater treatment process: emission and environmental risk assessment. **PLOS ONE**, v. 20, n. 9, p. e0331211, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0331211>.

CHEN, J. *et al.* Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from domestic sewage by constructed wetlands: effect of flow configuration and plant species. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 974–982, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.126>.

CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA; PARLAMENTO EUROPEU. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast). **Official Journal of the European Union**, L, 2024. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj>. Acesso em: 29 jun. 2026.

DE OLIVEIRA, J. F. *et al.* Quantification, removal and potential ecological risk of emerging contaminants in different organic loads of swine wastewater treated by integrated biological reactors. **Chemosphere**, v. 260, p. 127516, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127516>.

FIALHO, D. E. S. **Caracterização do esgoto sanitário e avaliação da eficiência da ETE/UFLA na remoção de fármacos e desreguladores endócrinos**. 2019. 98 p.

Dissertação (Mestrado em Tecnologias e Inovações Ambientais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

FREUNDLICH, H. M. F. Over the adsorption in solution. **Journal of Physical Chemistry**, v. 57, p. 385–470, 1906.

GARCÍA-MARTÍNEZ, V. *et al.* Adsorption of pharmaceutical compounds on composite adsorbents: mechanisms and kinetics. **Journal of Environmental Management**, v. 306, p. 114435, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114435>.

GONÇALVES, R. *et al.* Contexto do consumo de medicamentos no Brasil: análise de padrões epidemiológicos e automedicação. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 3, e8813345292, 2024. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i3.45292>.

GORITO, A. M. *et al.* Constructed wetland microcosms for the removal of organic micropollutants from freshwater aquaculture effluents. **Science of the Total Environment**, v. 644, p. 1171–1180, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.030>.

GOSAI, H. G. *et al.* Ocorrência e toxicidade de microcontaminantes orgânicos na perspectiva agrícola: uma visão geral. In: _____. **Micropoluentes orgânicos em ambientes aquáticos e terrestres**. [S.l.]: [s.n.], 2024. p. 107–126.

GRĂDINARIU, L. *et al.* Oxidative stress biomarkers in fish exposed to environmental concentrations of pharmaceutical pollutants: a review. **Biology**, v. 14, n. 5, p. 472, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology14050472>.

GRELA, A.; KUC, J.; BAJDA, T. A review on the application of zeolites and mesoporous silica materials in the removal of non-steroidal anti-inflammatory drugs and antibiotics from water. **Materials**, v. 14, n. 17, p. 4994, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14174994>.

HE, Y. *et al.* Removal of pharmaceuticals from wastewater: a review of current treatment technologies and perspectives. **Water Research**, v. 212, p. 118095, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118095>.

HEJNA, M.; KAPUŚCIŃSKA, D.; AKSMANN, A. A sensitive and reliable method for the quantitative determination of hydrogen peroxide produced by microalgae cells. **Journal of Phycology**, v. 60, n. 6, p. 1356–1370, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpy.13562>.

HERNÁNDEZ-ZAMORA, M. *et al.* Diclofenac produces diverse toxic effects on aquatic organisms of different trophic levels, including microalgae, cladocerans, and fish. **Water**, v. 17, n. 10, p. 1489, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17101489>.

KARTHIK, R. M.; PHILIP, L. Sorption of pharmaceutical compounds and nutrients by various porous low cost adsorbents. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 104916, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104916>.

KUHN, D. C. *et al.* White cement as a nontoxic and eco-friendly adsorbent for phosphate adsorption/desorption: characterization, optimization, and modeling studies. **ACS EST Water**, v. 4, p. 2731–2745, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00246>.

KUMAR, P. *et al.* Agricultural waste-derived activated carbon for adsorption of pharmaceuticals and personal care products: a sustainable approach. **Science of the Total Environment**, v. 839, p. 156232, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156232>.

KUMAR, R.; SINGH, D.; SINGH, A. Emerging trends in the adsorption of pharmaceuticals from water using nanostructured carbon materials. **Environmental Science: Nano**, v. 10, n. 3, p. 623–645, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2EN00948A>.

KÜMMERER, K. **Pharmaceuticals in the environment**: sources, fate, effects and risks. 3. ed. Berlin: Springer, 2020.

KYZAS, G. Z.; MITROPOULOS, A. C. Nanoadsorbents for pollutants removal: a review. **Journal of Molecular Liquids**, v. 324, p. 114–123, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114123>.

LACH, J.; SZYMONIK, A. Adsorption of naproxen sodium from aqueous solutions on commercial activated carbons. **Journal of Ecological Engineering**, v. 20, n. 10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/112867>.

LANGMUIR, I. 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. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>.

LI, B. *et al.* Occurrence, toxicity, impact and removal of selected non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs): a review. **Science of the Total Environment**, v. 898, art. 165317, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165317>.

LIMA, E. C. *et al.* Adsorption of emerging contaminants onto activated carbons prepared from agro-industrial wastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 402, p. 123537, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123537>.

LIU, Y. *et al.* Toxic effects of environmentally relevant concentrations of naproxen on *Daphnia magna*: antioxidant system disruption, developmental toxicity and reproductive impairment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, p. 34512–34524, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33157-7>.

LIU, Y. *et al.* Advanced carbon-based nanocomposites for removal of pharmaceuticals from aqueous matrices: focus on NSAIDs. **Chemical Engineering Journal**, v. 449, p. 138116, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.138116>.

MABALANE, K.; THABEDE, P. M.; SHOOTO, N. D. Removal of ibuprofen and paracetamol from water using a blend activated carbon from paper waste and avocado seeds. **Green Analytical Chemistry**, v. 10, p. 100135, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100135>.

MANSOURI, F. *et al.* Removal of pharmaceuticals from water by adsorption and advanced oxidation processes: state of the art and trends. **Applied Sciences**, v. 11, n. 14, p. 6659, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11146659>.

MARCELINO, G. R. *et al.* Construction waste as substrate in vertical subsuperficial constructed wetlands treating organic matter, ibuprofen, acetaminophen and ethinylestradiol from low-strength synthetic wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 728, p. 138771, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138771>.

MARGUÍ, E.; QUERALT, I.; DE ALMEIDA, E. X-ray fluorescence spectrometry for environmental analysis: basic principles, instrumentation, applications and recent trends. **Chemosphere**, v. 303, p. 135006, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135006>.

MECHNOU, I. *et al.* Activated carbons for effective pharmaceutical adsorption: impact of feedstock origin, activation agents, adsorption conditions, and cost analysis. **Results in Engineering**, p. 105966, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105966>.

MELO, S. A. S. *et al.* Environmental fate and photochemical behavior of emerging contaminants under natural sunlight. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.114899>.

MUSTAFA, A. *et al.* Biochar derived from sugarcane bagasse for the adsorption of non-steroidal anti-inflammatory drugs in wastewater. **Water Research**, v. 206, p. 117671, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117671>.

MYERS, T. G.; CABRERA-CODONY, A.; VALVERDE, A. On the development of a consistent mathematical model for adsorption in a packed column (and why standard models fail). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 202, p. 123660, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123660>.

NODEH, M. K. M. *et al.* Equilibrium and kinetics studies of naproxen adsorption onto novel magnetic graphene oxide functionalized with hybrid glycidoxo-amino propyl silane. **Environmental Challenges**, v. 4, p. 100106, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100106>.

ORTIZ, M. E. B.; GARCÍA, J. J. R.; SERRANO, A. R. Sorption of carbamazepine and naproxen in fixed-bed columns with HDTMA-modified zeolite. **Cleaner Water**, p. 100187, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clwat.2025.100187>.

PESIK, J.; ZALEWSKA, M.; STANISZEWSKA, M. Adsorption and transformation of pharmaceuticals using mineral-based adsorbents. **Journal of Hazardous Materials**, v. 443, p. 130245, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130245>.

PETRIE, B.; CAMACHO-MUÑOZ, D. Analysis, fate and toxicity of chiral non-steroidal anti-inflammatory drugs in wastewaters and the environment: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 1, p. 43–75, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01098-5>.

PIRIYA, R. S. *et al.* Coconut shell derived ZnCl₂ activated carbon for malachite green dye removal. **Water Science and Technology**, v. 83, n. 5, p. 1167–1182, 2021. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.050>.

POOJA, G. *et al.* Effective removal of ibuprofen from aqueous solution using cationic surface-active agents in dissolved air-flotation process. **International Journal of Chemical Engineering**, v. 2024, n. 1, p. 9014776, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/9014776>.

QUESADA, H. B. *et al.* Surface water pollution by pharmaceuticals and an alternative of removal by low-cost adsorbents: a review. **Chemosphere**, v. 222, p. 766–780, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.009>.

IUPAC – INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY.

Compendium of Chemical Terminology (the Gold Book). 2. ed. Research Triangle Park: IUPAC, 2014. Disponível em: <https://goldbook.iupac.org>. Acesso em: 29 jun. 2026.

SANSON, A. L. **Estudo da extração e desenvolvimento de metodologia para determinação simultânea de microcontaminantes orgânicos em água superficial por GC-MS e métodos quimiométricos**. 2012. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2012.

SANSON, A. L. *et al.* Equipamento de baixo custo para extração em fase sólida em amostras aquosas de grande volume utilizando pressão positiva de N₂. **Química Nova**, v. 37, p. 150–152, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422014000100025>.

SANTOS, L. H. *et al.* Ecotoxicological effects of anti-inflammatory pharmaceuticals in aquatic organisms: a review. **Environment International**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107463>.

SHARIB, A. S. A. *et al.* Facile and green fabrication of an effective and low-cost alkali-activated binder using carbonized limestone: characterization, experiments, and statistical physics formalism for ibuprofen adsorption. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 41, p. 101701, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101701>.

SHOOTO, N. D.; THABEDE, P. M. Adsorption of ibuprofen from water using waste from rose geranium (*Pelargonium graveolens*) stems. **Applied Sciences**, v. 15, p. 7203, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15137203>.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SILVA, T. A. *et al.* Evaluation of zeolite-based adsorbents for pharmaceutical removal from aqueous solutions. **Chemical Engineering Journal**, v. 425, p. 131456, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131456>.

SIYAL, A. A.; MOHAMED, R. M. S.; AHMAD, F. *et al.* A review of adsorbents for the efficient adsorption of pharmaceuticals from wastewater. **RSC Advances**, v. 15, p. 17843–17861, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/D5RA02007G>.

SMILJANIĆ, D. *et al.* Removal of non-steroidal anti-inflammatory drugs from water by zeolite-rich composites: the interference of inorganic anions on the ibuprofen and naproxen adsorption. **Journal of Environmental Management**, v. 286, p. 112168, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112168>.

SUI, Q.; ZHANG, J. *et al.* Pharmaceutical pollution in aquatic environments: occurrence, fate and risk. **Frontiers in Pharmacology**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.939832>.

SUSILAWATI *et al.* The effectiveness of Pahae natural zeolite–cocoa shell activated charcoal nanofilter as a water adsorber in bioethanol purification. **ACS Omega**, v. 7, n. 43, p. 38417–38425, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04162>.

TAI, Y. *et al.* Assessment of rhizosphere processes for removing water-borne macrolide antibiotics in constructed wetlands. **Science of the Total Environment**, v. 646, p. 120–128, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.314>.

TRAN, H. N. *et al.* Comment on “Comparative analysis of adsorption isotherm models for organic pollutants”. **Chemical Engineering Journal**, v. 307, p. 507–514, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.020>.

VALVERDE, A. *et al.* Investigating the impact of adsorbent particle size on column adsorption kinetics through a mathematical model. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 218, p. 124724, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124724>.

VERBEECK, R. K.; BLACKBURN, J. L.; LOEWEN, G. R. Clinical pharmacokinetics of non-steroidal anti-inflammatory drugs. **Clinical Pharmacokinetics**, v. 8, p. 297–331, 1983. DOI: <https://doi.org/10.2165/00003088-198308040-00001>.

VILA, M. A. *et al.* Nanocarbon functionalized materials for improved pharmaceutical adsorption from water. **Environmental Science & Technology**, v. 57, n. 8, p. 1234–1245, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00123>.

WOJCIESZYŃSKA, D.; GUZIK, U. Naproxen in the environment: its occurrence, toxicity to nontarget organisms and biodegradation. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 104, n. 5, p. 1849–1857, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10343-x>.

YU, X. *et al.* Phosphorus adsorption from aqueous solutions using different types of cement: kinetics, isotherms, and mechanisms. **RSC Advances**, v. 14, n. 22, p. 15637–15646, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4RA01802A>.

ZHAI, X. *et al.* Non-steroidal anti-inflammatory drugs as emerging water and food contaminants: review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-025-09735-5>.

ZHANG, X. *et al.* Adsorption behaviors of ibuprofen and naproxen on modified biochar: influence of surface chemistry and solution conditions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 391, p. 122130, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122130>.

ZHANG, Y.; GEIßEN, S. U.; GAL, C. Carbamazepine and ibuprofen removal from water by adsorption on activated carbon prepared from agricultural waste. **Chemosphere**, v. 285, p. 131430, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131430>.