

OZONIZAÇÃO APLICADA À REMOÇÃO DE FÁRMACOS: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Aline Schaab

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS
alineschaab@edu.unisinos.br

Bethania Brochier

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS
bethaniab@unisinos.br

Iara Janaina Fernandes

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS
iarajf@unisinos.br

Amanda Gonçalves Kieling

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS
amandag@unisinos.br

Resumo: A presença de contaminantes emergentes em ambientes aquáticos tem despertado uma crescente preocupação devido aos potenciais impactos ambientais e à limitada capacidade dos sistemas convencionais de tratamento em removê-los. Nesse contexto, a ozonização tem se destacado como uma tecnologia promissora na remoção desses contaminantes, em especial dos fármacos. O presente estudo teve como objetivo analisar, através de uma revisão sistemática da literatura, a aplicação da ozonização na remoção dos fármacos diclofenaco e ibuprofeno em diferentes matrizes aquosas, avaliando a influências das condições operacionais utilizadas. A revisão foi realizada utilizando as bases de dados Scopus e Web of Science. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, 12 artigos publicados entre 2020 e 2025 foram analisados. Os estudos foram avaliados quanto a matriz aquosa empregada, dose de ozônio, tempo de contato e percentual de remoção dos contaminantes. Os resultados apontam uma elevada eficiência da ozonização para o diclofenaco, com percentuais de remoção superiores a 90% em todos os estudos analisados. Para o ibuprofeno, as remoções apresentaram maior variabilidade, oscilando entre aproximadamente 50% e 99%. Foi observado uma predominância de estudos realizados com efluentes reais de estações de tratamento de esgoto, demonstrando o interesse em avaliar a tecnologia em condições operacionais próximas a realidade. Conclui-se que a ozonização apresenta potencial para a remoção de fármacos em matrizes aquosas, principalmente para compostos com alta reatividade ao ozônio, como o diclofenaco.

Palavras-chave: Ozonização, Diclofenaco, Ibuprofeno, Contaminantes Emergentes.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

OZONATION FOR PHARMACEUTICAL REMOVAL: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Abstract: *The presence of emerging contaminants in aquatic environments has raised growing concern due to their potential environmental impacts and the limited ability of conventional treatment systems to remove them. In this context, ozonation has emerged as a promising technology for removing these contaminants, particularly pharmaceuticals. The objective of this study was to analyze, through a systematic literature review, the application of ozonation in the removal of the pharmaceuticals diclofenac and ibuprofen from different aqueous matrices, evaluating the influence of the operational conditions used. The review was conducted using the Scopus and Web of Science databases. After applying the inclusion and exclusion criteria, 12 articles published between 2020 and 2025 were analyzed. The studies were evaluated based on the aqueous matrix used, ozone dose, contact time, and percentage of contaminant removal. The results indicate high efficiency of ozonation for diclofenac, with removal percentages exceeding 90% in all analyzed studies. For ibuprofen, removal rates showed greater variability, ranging from approximately 50% to 99%. A majority of the studies were conducted using actual effluents from wastewater treatment plants, demonstrating an interest in evaluating the technology under operational conditions that closely resemble real-world scenarios. It is concluded that ozonation has the potential to remove pharmaceuticals from aqueous matrices, particularly for compounds that are highly reactive with ozone, such as diclofenac.*

Keywords: Ozonation, Diclofenac, Ibuprofen, Emerging Contaminants.

1. INTRODUÇÃO

A industrialização promoveu mudanças expressivas nos padrões de poluição, introduzindo novos contaminantes no meio ambiente. As atividades antropogênicas têm esgotado cada vez mais os recursos naturais e favorecido o desenvolvimento de novas moléculas químicas, resultando em descarte de resíduos que ultrapassam os limites seguros (WANG *et al.*, 2024).

Contaminantes emergentes (CE) ou micropoluentes referem-se a substâncias que não são removidas ou eliminadas pelos métodos convencionais de tratamento de água e efluentes. Essas substâncias, mesmo em pequenas quantidades, podem causar malefícios à fauna e à flora (CHAGAS; MANGAS; SILVA, 2022). Os contaminantes emergentes incluem fármacos, hormônios naturais e sintéticos, produtos de higiene pessoal, pesticidas, fertilizantes e metais pesados (PURI; GANDHI; KUMAR, 2023). Esses compostos podem chegar aos sistemas de esgoto por diferentes vias, como efluentes industriais, domésticos e hospitalares e descarte inadequado de resíduos (ESCHER; STAPLETON; SCHYMANSKI, 2020).

Segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária - Anvisa (2020), fármaco é o componente farmacologicamente ativo destinado à formulação de medicamentos, os quais possuem finalidade profilática, curativa, paliativa ou para fins de diagnóstico. Entre os compostos pertencentes a esse grupo encontram-se o ibuprofeno e o diclofenaco, ambos classificados como anti-inflamatórios não

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

esteroidais (AINEs). O ibuprofeno (IBU) é amplamente utilizado para tratar dores de cabeça e inflamações, enquanto o diclofenaco (DCF) é utilizado no tratamento de inflamações e dores associadas a condições como artrite reumatoide. Paralelamente, a indústria farmacêutica tem produzido ingredientes farmacêuticos ativos mais eficientes, com elevada potência, maior biodisponibilidade e maior resistência à degradação, o que aumenta a persistência desses compostos em ambientes aquáticos (KHETAN; COLLINS, 2007; KIM *et al.*, 2026; PAHUNANG *et al.*, 2026).

Devido à resistência que os compostos apresentam à remoção pelos processos convencionais de tratamento de esgoto, a utilização de tecnologias avançadas é essencial para remoção de contaminantes emergentes (CARTAXO *et al.*, 2020). Nesse contexto, a ozonização tem se mostrado uma alternativa eficiente na remoção de micropoluentes orgânicos em efluentes sanitários, uma vez que o ozônio é um oxidante poderoso e seletivo, capaz de oxidar rapidamente substâncias orgânicas, contribuindo para a melhoria da qualidade da água (CHIAVOLA *et al.*, 2025; RIZZO *et al.*, 2019).

Nos últimos anos, estudos têm investigado o uso da ozonização para a remoção de contaminantes emergentes em efluentes e águas. Apesar de resultados favoráveis, observa-se, entre os estudos, uma variabilidade quanto às condições operacionais utilizadas, como dose de ozônio, tempo de contato e características da matriz aquosa. Além disso, os percentuais de remoção dos fármacos ibuprofeno e diclofenaco podem variar em função desses fatores, dificultando a identificação das condições mais favoráveis para a aplicação do processo. Dessa forma, a elaboração de uma síntese da literatura torna-se fundamental para reunir e analisar criticamente os resultados de diferentes estudos, permitindo identificar avanços e tendências relacionados à aplicação da ozonização destes fármacos específicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada através de uma revisão sistemática da literatura, utilizando as diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), com o objetivo de garantir maior rigor metodológico ao estudo. A revisão teve como finalidade identificar e analisar estudos que investigaram a aplicação da ozonização na remoção dos contaminantes emergentes ibuprofeno e diclofenaco em águas, efluentes e águas residuais.

A estrutura do trabalho foi desenvolvida a partir da formulação da questão de pesquisa, definição dos elementos do critério PICO, elaboração e aperfeiçoamento das estratégias de busca, aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e seleção dos estudos por meio da triagem de títulos, resumos e leitura completa dos artigos. Posteriormente, os estudos selecionados foram analisados quanto às condições operacionais de ozonização, incluindo tempo de contato, dose de ozônio, tipo de matriz aquosa utilizada e eficiência de remoção dos fármacos alvo.

2.1. Formulação da questão de pesquisa

A questão de pesquisa foi elaborada com base no critério PICO (População, Intervenção, Comparação e *Outcome*), com o objetivo de definir os limites da revisão sistemática e auxiliar na elaboração das estratégias de busca utilizadas nas bases de dados.

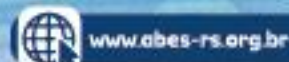
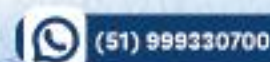
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



A questão da pesquisa foi definida como: como diferentes condições operacionais de ozonização, tais como dose de ozônio e tempo de contato, influenciam a remoção dos fármacos ibuprofeno e diclofenaco presentes em águas residuais e efluentes?

O Quadro 1 apresenta a estrutura PICO utilizada no estudo, contendo a definição de cada elemento que compõe a questão de pesquisa.

Quadro 1 – Estrutura PICO utilizada na revisão sistemática.

Elemento	Definição
População (P)	Águas residuais, efluentes hospitalares, águas contaminadas ou matrizes aquosas contendo ibuprofeno e/ou diclofenaco.
Intervenção (I)	Aplicação da ozonização para remoção dos contaminantes emergentes.
Comparação (C)	Diferentes condições operacionais de ozonização, incluindo dose de ozônio, tempo de contato, vazão de ozônio, concentração inicial dos contaminantes e características da matriz aquosa.
Outcome (O)	Eficiência de remoção dos fármacos ibuprofeno e diclofenaco, expressa por percentual de remoção, degradação ou redução de concentração.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.2. Base de dados e estratégia de busca

A busca foi realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science. As estratégias de busca foram aplicadas nos campos de título, resumo e palavras-chave, de acordo com as especificidades de cada base de dados, considerando artigos científicos publicados entre os anos de 2020 e 2026.

As buscas foram direcionadas a estudos que abordassem a remoção dos fármacos ibuprofeno e/ou diclofenaco por meio do processo de ozonização em águas, efluentes ou águas residuais. Além disso, foram aplicados filtros para restringir os resultados a artigos científicos e excluir estudos relacionados à ozonização catalítica e outros processos oxidativos avançados, de modo a concentrar a análise na ozonização convencional.

Primeiramente, foi realizada uma busca exploratória, com ajustes graduais dos termos utilizados nas *strings* de busca, envolvendo contaminantes emergentes, micropoluentes, fármacos e processos de tratamento de águas, a fim de entender a abrangência dos estudos sobre a remoção desses compostos em matrizes aquosas.

Posteriormente, a busca foi direcionada para estudos que abordassem especificamente os fármacos diclofenaco e ibuprofeno associados ao processo de ozonização. Essa etapa permitiu restringir a busca aos contaminantes de interesse e ao processo de tratamento selecionado.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Por fim, foi elaborada uma estratégia de busca mais precisa, combinando os termos relacionados aos fármacos de interesse (diclofenaco e ibuprofeno), ao processo de ozonização (ozonização e ozônio) e às matrizes aquosas (águas residuais, efluente e água). Desta forma, a *string* utilizada foi:

TITLE-ABS-KEY (diclofenac OR ibuprofen)

AND TITLE (ozonation OR ozone)

AND TITLE (wastewater OR effluent OR water)

AND NOT TITLE (catalyzation OR catalytic OR catalyst OR catalysed OR photocatalytic OR clay OR fenton OR AOPs OR nano)

Os termos relacionados aos fármacos foram pesquisados nos campos de título, resumo e palavras-chave, enquanto os termos referentes ao processo de ozonização, à matriz aquosa e aos critérios de exclusão foram restringidos ao campo título, com o objetivo de aumentar a especificidade dos resultados.

2.3. Critérios de inclusão e exclusão

Os critérios de inclusão e exclusão utilizados na seleção dos estudos foram definidos com base na questão de pesquisa e nos elementos do critério PICO, para garantir a identificação de artigos alinhados ao objetivo da revisão sistemática. Esses critérios foram aplicados durante as etapas de triagem e avaliação dos estudos, considerando aspectos relacionados ao período de publicação, tipo de documento, temática abordada e características do processo de tratamento investigado. O Quadro 2 apresenta os critérios adotados para a seleção dos artigos incluídos nesta revisão.

Quadro 2 – Critérios de inclusão e exclusão dos artigos

Tipo	Critério
Inclusão	Artigos publicados no período de 2020 a 2026.
Inclusão	Artigos publicados em periódicos científicos.
Inclusão	Estudos indexados nas bases Scopus ou Web of Science.
Inclusão	Artigos que ficasse nas áreas de engenharia, química e ambiental.
Inclusão	Estudos que abordassem os fármacos ibuprofeno e/ou diclofenaco.
Inclusão	Estudos que envolvessem aplicações em águas ou efluentes ou águas residuais.
Inclusão	Estudos que avaliassem o processo de ozonização na remoção ou degradação dos fármacos.
Exclusão	Artigos fora do período definido.
Exclusão	Revisões, capítulos de livro, trabalhos de congresso e teses, dissertações
Exclusão	Estudos que não abordassem ibuprofeno ou diclofenaco.
Exclusão	Estudos que utilizassem processos catalíticos incluindo catalisação, fotocatalise, processo Fenton, materiais argilosos, nanopartículas ou outros processos oxidativos avançados.
Exclusão	Estudos que não utilizassem a ozonização como processo de tratamento.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

2.4. Seleção e triagem dos estudos

A partir dos resultados obtidos nas bases de dados utilizadas, elaborou-se uma tabela contendo informações sobre os artigos, como título, autores e ano de publicação. Em seguida, foi realizada a remoção dos artigos duplicados. Ao todo, foram identificados 36 artigos nas bases de dados consultadas, dos quais 10 foram excluídos por duplicidade, resultando em 26 estudos para a etapa de triagem.

Após esta fase, os artigos foram avaliados em duas etapas. Primeiro, realizou-se a triagem por título e resumo, verificando a conformidade dos estudos com a questão de pesquisa, com os elementos do critério PICO e com os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos. Nesta etapa, 13 artigos foram excluídos pois não apresentavam relação direta com o escopo da revisão.

Na segunda etapa, os artigos com maior potencial foram submetidos à leitura completa para confirmar sua adesão ao escopo da revisão. Verificou-se se os estudos avaliavam a aplicação da ozonização na remoção dos fármacos em águas, efluentes ou águas residuais e se as condições de operação utilizadas nos estudos eram citadas. Nessa etapa, um artigo foi excluído por não atender aos critérios da revisão, uma vez que seu foco principal estava na modelagem do processo de ozonização, e não na avaliação da remoção dos fármacos de interesse.

Durante a leitura, foram extraídas informações importantes e elaborada uma tabela, incluindo os fármacos avaliados, o tipo de matriz aquosa utilizada, as condições operacionais do processo de ozonização (como dose de ozônio e tempo de contato) e os percentuais de remoção obtidos. Ao final do processo de seleção, 12 artigos atenderam aos critérios de inclusão estabelecidos e foram incluídos nesta revisão sistemática.

O processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos foi conduzido de acordo com as recomendações da ferramenta PRISMA. A Figura 1 apresenta o fluxograma das etapas de seleção dos estudos, desde a identificação dos registros nas bases de dados até a definição dos artigos incluídos na revisão sistemática.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700

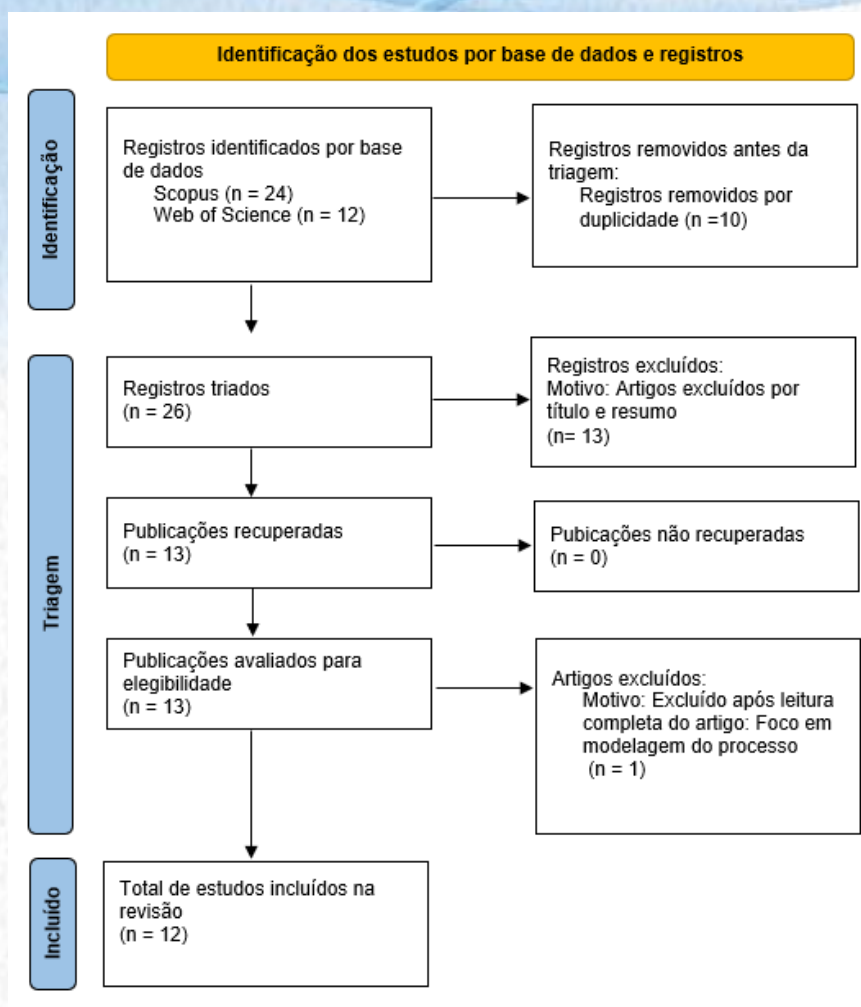


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 1 – Fluxograma PRISMA



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após a leitura dos artigos selecionados, realizou-se uma análise qualitativa e quantitativa da literatura, com o intuito de identificar tendências, similaridades, diferenças metodológicas e lacunas relacionadas à aplicação do ozônio na remoção dos fármacos ibuprofeno e diclofenaco em matrizes aquosas.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



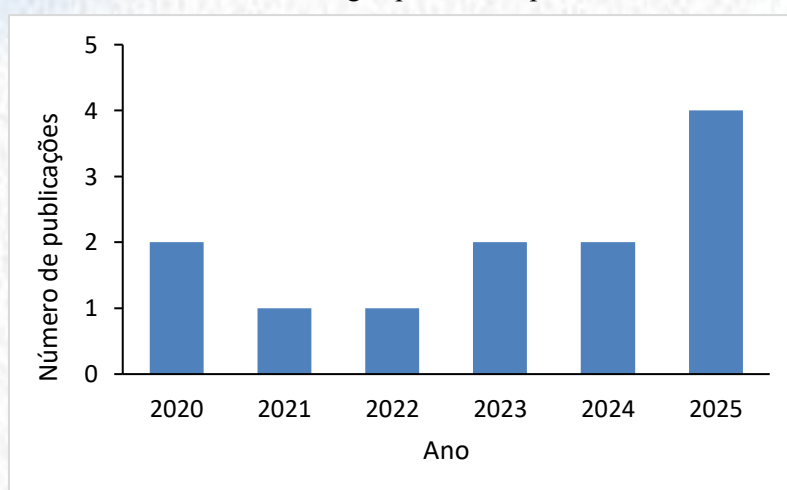
www.abes-rs.org.br

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização dos estudos

Os 12 estudos incluídos nesta revisão foram publicados entre 2020 e 2025. Embora a estratégia de busca tenha englobado o período de 2020 a 2026, nenhum artigo publicado em 2026 foi incluído na revisão final, uma vez que os estudos identificados não atenderam aos critérios de inclusão estabelecidos para esta pesquisa. O Gráfico 1 apresenta o número de artigos publicados em cada ano.

Gráfico 1 – artigos publicados por ano.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O ano de 2025 apresentou o maior número de publicações, totalizando 4 estudos, seguido pelos anos de 2023 e 2024, com 2 artigos cada. Já os anos de 2021 e 2022 apresentaram apenas 1 estudo selecionado em cada período. Esse comportamento sugere um aumento do interesse pelo uso da ozonização na remoção de contaminantes emergentes em matrizes aquosas nos últimos anos. Esse crescimento pode estar relacionado à crescente preocupação com a presença de fármacos em ambientes aquáticos e ao debate sobre a necessidade de tratamentos avançados para complementar os sistemas convencionais de tratamento de águas residuais.

O Gráfico 2 apresenta a distribuição das diferentes matrizes aquosas utilizadas nos estudos. Na maior parte dos estudos, foram utilizados efluentes reais provenientes de estações de tratamento de esgoto (ETE), totalizando 9 artigos, confirmando o interesse crescente na aplicação da tecnologia em condições reais. Além disso, 1 estudo utilizou efluente hospitalar como matriz de investigação, enquanto 2 artigos utilizaram águas purificadas (deionizada ou destilada) para investigar mecanismos de degradação e influência de parâmetros no processo.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



(51) 999330700

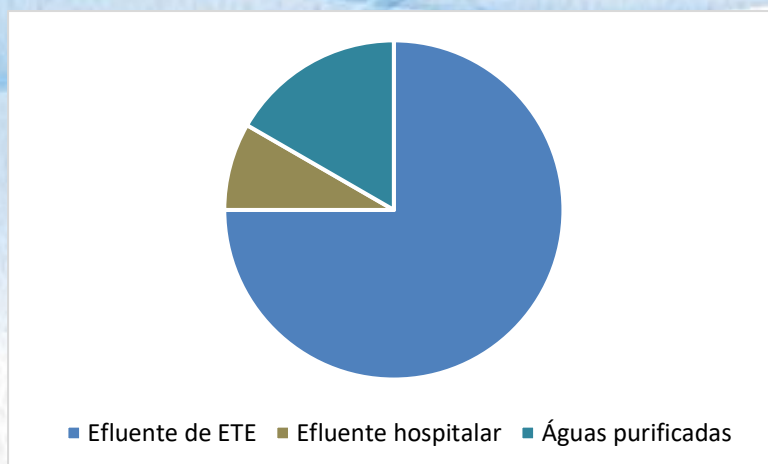


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

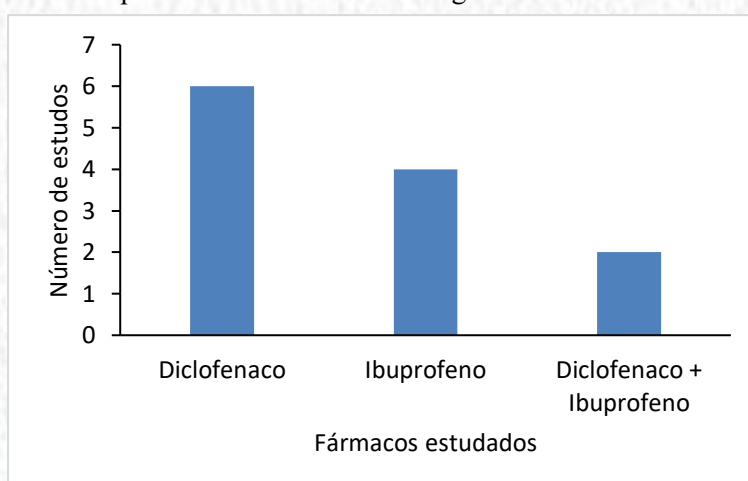
Gráfico 2 - Distribuição das matrizes aquosas utilizadas nos estudos selecionados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Entre os estudos selecionados, observou-se predominância de pesquisas voltadas à remoção do diclofenaco, totalizando 6 artigos, enquanto 4 artigos avaliaram a remoção do ibuprofeno e ambos os compostos foram estudados simultaneamente em 2 artigos. Esse resultado destaca o diclofenaco nas pesquisas relacionadas à ozonização, possivelmente devido à sua elevada ocorrência em ambientes aquáticos e sua persistência em sistemas convencionais de tratamento de água e esgoto. O Gráfico 3 mostra a distribuição dos fármacos avaliados nos estudos.

Gráfico 3 - Frequência dos fármacos investigados nos estudos selecionados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

A Tabela 1 apresenta uma síntese das principais características dos estudos selecionados, incluindo o fármaco avaliado, dose de ozônio empregada, tempo de contato, matriz utilizada e eficiência de remoção obtida.

Tabela 1 - Características dos estudos selecionados e eficiência da ozonização na remoção de diclofenaco e ibuprofeno.

Referência	DCF	IBU	Dose de ozônio	Tempo de contato	Matriz aquosa	Remoção DCF (%)	Remoção IBU (%)
Villota; Duoandicoechea; Tosi-Zarate (2025)	x		14,3 mg O ₃ /min	0–60 min	Água destilada	~96-100	-
Macsek et al. (2025)	x		0,8 mg O ₃ /mg TOC	10,5 min	Efluente de ETE	>95	-
Ferreux et al. (2025)	x		0,52–2,73 g O ₃ /g C	0-120 min	Efluente de ETE	>90	-
Mansimli; Ateş (2025)	x	x	0,05–5,0 mg O ₃ /mg COD	Não informado	Efluente hospitalar	>99,7	>99,8
Spilsbury et al. (2024)	x	x	0,15–1,05 mg O ₃ /mg DOC	7 min	Efluente de ETE	Abaixo do limite detectável	Não informado
Kye et al. (2024)		x	0,16–1,8 g O ₃ /g DOC	0-10 min	Efluente de ETE	-	~50
Wang et al. (2023)		x	0,5-1,0 mg O ₃ /L	40-60 min	Água deionizada	-	~60-80
Koo et al. (2023)		x	0,25–1,5 g O ₃ /g DOC	5–10 min	Efluente de ETE	-	80
van Gijn et al. (2022)	x		0,2–0,8 g O ₃ /g TOC	Não informado	Efluente de ETE	>95	-
Ekblad et al. (2021)	x		0,2–0,8 mg O ₃ /mg DOC	7–20 min	Efluente de ETE	Abaixo do limite detectável	-
Szabová et al. (2020)	x		50 mg O ₃ /min	0–10 min	Efluente de ETE	>99,9	-
Farzaneh et al. (2020)		x	1,5 mg O ₃ /L	5 min	Efluente de ETE		~66-80

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

3.2. Eficiência da ozonização na remoção de diclofenaco e ibuprofeno

Os resultados obtidos a partir dos estudos analisados indicam que a ozonização apresenta um potencial para a remoção de contaminantes emergentes, especialmente para o diclofenaco. Em todos os estudos que reportaram dados quantitativos, foram observadas remoções superiores a 90%, sendo frequentes valores acima de 95% e, ainda, casos superiores a 99%.

Segundo Macsek *et al.* (2025) e Gjin *et al.* (2022), o diclofenaco é classificado como um composto de alta reatividade com o ozônio. Esse comportamento está associado à elevada constante de reação do diclofenaco com o ozônio ($kO_3 > 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$), favorecendo sua rápida oxidação direta durante o processo de ozonização.

Em contraste, o ibuprofeno apresentou comportamento mais variável. As eficiências de remoção reportadas variaram desde valores próximos a 50% até remoções superiores a 99%, dependendo das condições operacionais adotadas.

Segundo Kye *et al.* (2024), o ibuprofeno apresenta baixa reatividade ao ozônio ($kO_3 = 9,6 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$), o que contribui para menores eficiências de remoção durante a ozonização, principalmente em matrizes mais complexas, onde o fármaco compete com a matéria orgânica dissolvida pelos oxidantes disponíveis.

3.3. Influência dos parâmetros operacionais na remoção dos contaminantes

As doses de ozônio apresentaram ampla variação e foram expressas em diferentes unidades, como $\text{mg O}_3/\text{L}$, $\text{mg O}_3/\text{min}$, $\text{mg O}_3/\text{mg DOC}$, $\text{mg O}_3/\text{mg TOC}$, $\text{mg O}_3/\text{mg COD}$ e $\text{g O}_3/\text{g C}$. Essa diversidade dificulta a comparação direta entre os estudos, uma vez que cada autor adotou uma forma distinta de normalização da dose utilizada. Apesar dessa heterogeneidade, observou-se que elevadas eficiências de remoção foram alcançadas em diferentes faixas de dosagem, indicando que a eficiência do processo não depende apenas da quantidade de ozônio aplicada, mas também das características do contaminante e da matriz aquosa tratada.

A presença de matéria orgânica dissolvida pode reduzir a eficiência da ozonização devido à competição pelos oxidantes disponíveis. Esse efeito é particularmente importante para compostos de baixa reatividade ao ozônio, como o ibuprofeno, que precisam competir com os constituintes da matriz aquosa para reagir com o oxidante disponível (KYE *et al.*, 2024). Como consequência, efluentes com maior carga orgânica podem demandar doses maiores de ozônio para atingir elevadas eficiências de remoção dos contaminantes desejados.

O tempo de contato também influenciou no desempenho do processo. Embora alguns estudos tenham avaliado períodos de até 120 minutos, verificou-se que grande parte da degradação ocorreu nos primeiros minutos de tratamento, uma vez que a maioria dos trabalhos utilizou intervalos iguais ou inferiores a 20 minutos. No estudo de Szabová *et al.* (2020), o diclofenaco apresentou remoção superior a 90% no primeiro minuto de contato com o ozônio. Villota *et al.* (2025) observaram uma rápida redução da concentração de diclofenaco nos primeiros 10 minutos de tratamento. Já para o ibuprofeno, a resposta ao aumento do tempo de contato mostrou-se mais variável, dependendo da dose aplicada e das características da matriz.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Outro aspecto relevante refere-se ao tipo de água utilizada nos experimentos. As matrizes reais apresentam maior complexidade devido à presença de matéria orgânica dissolvida, nitritos e outros constituintes que consomem parte do ozônio disponível, reduzindo a exposição dos fármacos ao oxidante. Dessa forma, a eficiência da degradação pode ser influenciada pelas características da matriz aquosa (MACSEK *et al.*, 2025). Mesmo com essa complexidade, a maioria dos estudos selecionados utilizou efluentes reais de estações de tratamento de esgoto ou efluente hospitalar, demonstrando o interesse em investigar a eficiência da ozonização em condições reais de operação.

O uso de água purificada (deionizada ou destilada) torna os experimentos menos complexos, uma vez que não há a presença de compostos competidores nessas matrizes. Em consequência, tende-se a observar maiores eficiências de remoção em comparação às obtidas em efluentes reais. Esse comportamento foi observado no estudo de Villota *et al.* (2025), que obteve remoções do diclofenaco entre 96 e 100%, utilizando água destilada como matriz experimental. Em contrapartida, estudos conduzidos com efluentes reais apresentaram remoções ligeiramente inferiores para o mesmo fármaco, como os valores próximos a 90% observados por Ferreux *et al.* (2025) e cerca de 95% reportados por Macsek *et al.* (2025). Esses resultados sugerem que constituintes do efluente podem influenciar a disponibilidade de ozônio para a degradação dos contaminantes. Ainda assim, a elevada reatividade do diclofenaco com o ozônio permite a obtenção de altas eficiências de remoção mesmo em matrizes aquosas mais complexas.

Enquanto o diclofenaco apresentou elevadas remoções tanto em águas purificadas quanto em efluentes reais, o ibuprofeno demonstrou comportamento mais variável. No estudo de Wang *et al.* (2023), por exemplo, foram observadas remoções entre 60% e 80% em água deionizada, mesmo na ausência de compostos competidores. Esse resultado pode ser atribuído à baixa reatividade do fármaco com o ozônio (KYE *et al.*, 2024), indicando que a eficiência da ozonização não depende exclusivamente da matriz aquosa, mas também da reatividade do contaminante com o ozônio.

Portanto, os resultados indicam que a otimização da dose de ozônio e do tempo de contato é fundamental para maximizar a remoção dos contaminantes emergentes, especialmente quando o processo é aplicado ao tratamento de efluentes reais. Além disso, as características da matriz aquosa também exercem influência sobre a eficiência do processo, uma vez que a presença de matéria orgânica dissolvida e outros constituintes podem consumir parte do ozônio disponível. Dessa forma, a eficiência da ozonização depende da interação entre as condições operacionais utilizadas, a matriz aquosa empregada e as propriedades químicas dos contaminantes analisados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão sistemática permitiu analisar e compilar dados sobre a aplicação da ozonização na remoção dos fármacos diclofenaco e ibuprofeno em diferentes matrizes aquosas, além de avaliar as condições operacionais utilizadas nos estudos selecionados. Os resultados demonstram que, para o diclofenaco, a ozonização mostrou-se altamente eficiente, com percentuais superiores a 90% em todos os estudos analisados. Em contrapartida, o ibuprofeno apresentou comportamento mais variável, com percentuais de remoção variando entre aproximadamente 50% e 99%, destacando a influência das características dos contaminantes no desempenho do processo.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Verificou-se que grande parte dos estudos foi conduzida com efluentes de estações de tratamento de esgoto, evidenciando o interesse da aplicação da tecnologia em cenários reais. De modo geral, os resultados indicam que a ozonização é uma tecnologia promissora para a remoção de fármacos em matrizes aquosas, especialmente para compostos com elevada reatividade ao ozônio, como o diclofenaco. Contudo, a heterogeneidade das formas de expressar as doses de ozônio dificulta a comparação direta entre os estudos, demonstrando a necessidade de pesquisas futuras que contribuam para a padronização dos parâmetros de avaliação do processo.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

5. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA - ANVISA. **Conceitos e Definições**. [S. l.], 2020.

CARTAXO, Amanda da Silva Barbosa *et al.* CONTAMINANTES EMERGENTES PRESENTES EM ÁGUAS DESTINADAS AO CONSUMO HUMANO: OCORRÊNCIA, IMPLICAÇÕES E TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], vol. 6, nº 8, p. 61814–61827, 2020.

CHIAVOLA, Agostina *et al.* Application of adsorption and ozonation as quaternary treatment of WWTP effluent for the removal of contaminants of emerging concern: Results from laboratory scale experiments. **Journal of Hazardous Materials Advances**, [s. l.], vol. 18, 2025.

EKBLAD *et al.* Influence of operational conditions and wastewater properties on the removal of organic micropollutants through ozonation. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], vol. 286, 2021.

ESCHER, Beate I; STAPLETON, Heather M; SCHYMANSKI, Emma L. **Tracking complex mixtures of chemicals in our changing environment**. [S. l.]: [s. d.], 2020. Disponível em: www.norman-network.com/nds/.

FARZANEH, Hajar *et al.* Ozone and ozone/hydrogen peroxide treatment to remove gemfibrozil and ibuprofen from treated sewage effluent: Factors influencing bromate formation. **Emerging Contaminants**, [s. l.], vol. 6, p. 225–234, 2020.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

FERREUX, Téo *et al.* Abatement of micropollutants and formation of transformation products in municipal wastewater effluent during ozonation: Complementarity of targeted and non-targeted analyses. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], vol. 496, 2025.

KHETAN, Sushil K.; COLLINS, Terrence J. **Human pharmaceuticals in the aquatic environment: A challenge to green chemistry**. [S. l.]: [s. d.], 2007.

KIM, Yubin *et al.* **Removal of ibuprofen by graphene-based nanoadsorbents in water: A review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2026.

KOO, Jae-Wuk *et al.* Evaluation of the prediction of micropollutant elimination during bromide ion-containing industrial wastewater ozonation using the ROH, O₃ value. **Chemosphere**, [s. l.], vol. 338, 2023.

KYE, Homin *et al.* Application of tryptophan-like fluorescence index to quantify the trace organic compounds removal in wastewater ozonation. **Chemosphere**, [s. l.], vol. 363, 2024.

MACSEK, Tomáš *et al.* Long-term application of ozonation for removal of pharmaceuticals from wastewater treatment plant effluent: Effectiveness, control strategies, ecotoxicity. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], vol. 489, 2025.

MANSIMLI, Mahammad; ATEŞ, Havva. Removal of pharmaceutically active compounds from hospital wastewater by ozonation pretreatment. **Environmental Research and Technology**, [s. l.], vol. 8, nº 3, p. 571–580, 2025.

PAHUNANG, Rekich *et al.* Removal of diclofenac from synthetic wastewater using corn cob-derived activated carbon. **Kuwait Journal of Science**, [s. l.], vol. 53, nº 3, p. 100610, 2026. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2307410826000805>.

PURI, Mehak; GANDHI, Kavita; KUMAR, M. Suresh. **Emerging environmental contaminants: A global perspective on policies and regulations**. [S. l.]: Academic Press, 2023.

RIZZO, Luigi *et al.* **Consolidated vs new advanced treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2019.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

SPILSBURY, Francis *et al.* Ecotoxicological mixture risk assessment of 35 pharmaceuticals in wastewater effluents following post-treatment with ozone and/or granulated activated carbon. **Science of the Total Environment**, [s. l.], vol. 906, 2024.

SZABOVÁ, Petra *et al.* Ozonation: effective way for removal of pharmaceuticals from wastewater. **Monatshefte fur Chemie**, [s. l.], vol. 151, nº 5, p. 685–691, 2020.

VAN GIJN *et al.* The effect of organic matter fractions on micropollutant ozonation in wastewater effluents. **Water Research**, [s. l.], vol. 222, 2022.

VILLOTA, Natalia; DUOANDICOECHEA, Unai; TOSI-ZARATE, Enzo Valentin. pH-Dependent Ozonation of Diclofenac: Molecular Insights and Implications for Water Quality and Nature-Based Water Reuse Systems. **Clean Technologies**, [s. l.], vol. 7, nº 2, 2025.

WANG, Fang *et al.* **Emerging contaminants: A One Health perspective**. [S. l.]: Cell Press, 2024.

WANG, Zhe *et al.* Ozonation of aromatic monomer compounds in water: factors determining reaction outcomes. **Frontiers of Environmental Science and Engineering**, [s. l.], vol. 17, nº 5, 2023.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br