

PRESENÇA DE RESÍDUOS FARMACÊUTICOS NO AMBIENTE: IMPACTOS QUÍMICOS, BIOLÓGICOS E RISCOS À SAÚDE

PRESENCE OF PHARMACEUTICAL RESIDUES IN THE ENVIRONMENT: CHEMICAL AND BIOLOGICAL IMPACTS AND RISKS TO HUMAN HEALTH

PRESENCIA DE RESIDUOS FARMACÊUTICOS EN EL MEDIO AMBIENTE: IMPACTOS QUÍMICOS, BIOLÓGICOS Y RIESGOS PARA LA SALUD HUMANA

Paulo de Tarcio da Silva Júnior¹

Giselle Silva de Souza²

Luiz Eduardo de Melo Lima³

Marília Palheta da Silva⁴

Xênia Luana Santos Silva⁵

Maria Leane da Silva⁶

Moisés Silva de Mendonça Júnior⁷

Maria Laiane da Silva⁸

RESUMO: O aumento do consumo de medicamentos nas últimas décadas tem contribuído para a presença de resíduos farmacêuticos no ambiente, configurando um problema emergente de saúde pública e ambiental. Este estudo teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura, seguindo as diretrizes do protocolo PRISMA, para analisar a ocorrência, o comportamento químico, os efeitos ecotoxicológicos e os riscos à saúde humana associados a esses contaminantes. A busca foi realizada nas bases Scopus, Web of Science, PubMed e SciELO, abrangendo o período de 2000 a 2025. Após o processo de seleção, 66 estudos compuseram o corpus analítico. Os resultados evidenciaram ampla distribuição de resíduos farmacêuticos, principalmente em ambientes aquáticos, decorrente do descarte inadequado, da excreção humana e animal e da limitada eficiência dos sistemas convencionais de tratamento de esgoto. Esses compostos apresentam elevada persistência ambiental, potencial de bioacumulação e formação de subprodutos tóxicos. Os efeitos incluem alterações fisiológicas, reprodutivas e comportamentais em organismos aquáticos, além de impactos sobre a biodiversidade. Para a saúde humana, destacam-se riscos relacionados à exposição crônica, à desregulação endócrina e à resistência antimicrobiana. Conclui-se que a poluição farmacêutica requer políticas públicas, tecnologias de tratamento mais eficientes e educação ambiental baseada no conceito de Saúde Única (One Health).

Palavras-chave: Resíduos farmacêuticos. Contaminantes emergentes. Ecotoxicologia.

¹Discente do curso de pós-graduação em Química Orgânica na Faculdade Metropolitana do Estado de São Paulo.

²Discente do curso de pós-graduação em Agricultura e Ambiente na Universidade Federal de Alagoas.

³Discente do curso de Pós-graduação em Agricultura e Ambiente na Universidade Federal de Alagoas.

⁴Mestre em agroecossistemas pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

⁵Discente do curso de Pós-graduação em Agricultura e Ambiente na Universidade Federal de Alagoas.

⁶Discente do curso de Zootecnia na Universidade Federal de Alagoas.

⁷Discente do curso de Agronomia na Universidade Federal de Alagoas.

⁸Discente do curso de Pós-graduação em Agricultura e Ambiente na Universidade Federal de Alagoas.

ABSTRACT: The increasing consumption of pharmaceuticals over recent decades has contributed to the presence of pharmaceutical residues in the environment, representing an emerging public health and environmental concern. This study aimed to conduct a systematic literature review following the PRISMA guidelines to analyze the occurrence, chemical behavior, ecotoxicological effects, and human health risks associated with these contaminants. The literature search was performed in Scopus, Web of Science, PubMed, and SciELO, covering publications from 2000 to 2025. After the selection process, 66 studies were included in the final analysis. The findings revealed the widespread occurrence of pharmaceutical residues, particularly in aquatic environments, resulting from improper disposal, human and animal excretion, and the limited efficiency of conventional wastewater treatment systems. These compounds exhibit high environmental persistence, bioaccumulation potential, and the ability to generate toxic by-products. Reported ecotoxicological effects include physiological, reproductive, and behavioral changes in aquatic organisms, as well as impacts on biodiversity. Regarding human health, the main concerns are chronic exposure, endocrine disruption, and antimicrobial resistance. It is concluded that pharmaceutical pollution requires stronger public policies, more efficient treatment technologies, and environmental education based on the One Health approach.

Keywords: Pharmaceutical residues. Emerging contaminants. Ecotoxicology.

RESUMEN: El aumento del consumo de medicamentos en las últimas décadas ha contribuido a la presencia de residuos farmacéuticos en el medio ambiente, constituyendo un problema emergente de salud pública y ambiental. Este estudio tuvo como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura, siguiendo las directrices del protocolo PRISMA, para analizar la ocurrencia, el comportamiento químico, los efectos ecotoxicológicos y los riesgos para la salud humana asociados a estos contaminantes. La búsqueda se realizó en las bases de datos Scopus, Web of Science, PubMed y SciELO, abarcando publicaciones entre 2000 y 2025. Tras el proceso de selección, 66 estudios fueron incluidos en el análisis final. Los resultados evidenciaron una amplia distribución de residuos farmacéuticos, especialmente en ambientes acuáticos, debido a la eliminación inadecuada, la excreción humana y animal, y la limitada eficiencia de los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales. Estos compuestos presentan alta persistencia ambiental, potencial de bioacumulación y capacidad para formar subproductos tóxicos. Los efectos incluyen alteraciones fisiológicas, reproductivas y conductuales en organismos acuáticos, además de impactos sobre la biodiversidad. En cuanto a la salud humana, destacan los riesgos relacionados con la exposición crónica, la alteración endocrina y la resistencia a los antimicrobianos. Se concluye que la contaminación farmacéutica requiere políticas públicas, tecnologías de tratamiento más eficientes y educación ambiental basadas en el enfoque de Una Sola Salud (One Health).

Palabras clave: Residuos farmacéuticos. Contaminantes emergentes. Ecotoxicología.

I INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo do consumo de medicamentos nas últimas décadas tem se consolidado como um dos principais desafios contemporâneos para a saúde pública e para a gestão ambiental. Esse aumento está associado a fatores como o envelhecimento populacional, a ampliação do acesso aos serviços de saúde e a prática da automedicação, resultando em maior produção e circulação de substâncias farmacologicamente ativas no ambiente. Nesse contexto, a destinação inadequada de medicamentos em desuso ou vencidos tem se tornado uma prática recorrente, frequentemente motivada pela falta de informação da população acerca dos riscos ambientais e sanitários associados ao descarte incorreto (Vieira, 2020).

No Brasil, considerado um dos maiores consumidores de medicamentos do mundo, observa-se que grande parte desses produtos é descartada de forma inadequada, seja no lixo comum ou em sistemas de esgotamento sanitário, como pias, ralos e vasos sanitários (Lemes *et al.*, 2021). Esse cenário contribui significativamente para a introdução de compostos farmacêuticos no ambiente, caracterizando-os como contaminantes emergentes, definidos como substâncias não rotineiramente monitoradas, mas que apresentam potencial risco à saúde humana e aos ecossistemas (Daughton; Ternes, 1999; Beek *et al.*, 2016). Estudos têm demonstrado a ocorrência global de resíduos farmacêuticos em diferentes compartimentos ambientais, incluindo águas superficiais, subterrâneas e efluentes domésticos (Kümmerer, 2009; Boxall *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2022).

A problemática é agravada pela limitada eficiência dos sistemas convencionais de tratamento de esgoto, os quais não foram projetados para remover completamente esses compostos, favorecendo sua persistência no ambiente (Lemes *et al.*, 2021). Além disso, os medicamentos, quando expostos a condições ambientais adversas, como luz, temperatura e umidade, podem sofrer transformações químicas que resultam na formação de subprodutos potencialmente mais tóxicos, capazes de afetar organismos aquáticos e interferir nos ciclos biogeoquímicos (Fent *et al.*, 2006; Deblonde *et al.*, 2011; Quemel *et al.*, 2021). Esses efeitos incluem alterações endócrinas, toxicidade crônica e impactos sobre a biodiversidade.

Outro aspecto relevante refere-se à presença de antibióticos no ambiente, que tem sido associada ao desenvolvimento e à disseminação da resistência antimicrobiana, considerada um dos maiores desafios globais em saúde pública (WHO, 2012; Kümmerer, 2009). Esse fenômeno

amplia os riscos à saúde humana, uma vez que compromete a eficácia de tratamentos médicos e favorece o surgimento de microrganismos resistentes.

No contexto brasileiro, a problemática é intensificada por limitações estruturais no saneamento básico e na gestão de resíduos sólidos. Embora a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, representa um avanço significativo ao estabelecer diretrizes para a destinação ambientalmente adequada de resíduos, ainda existem lacunas quanto à regulamentação específica, fiscalização e efetividade das ações voltadas ao descarte de medicamentos (Brasil, 2010; IBGE, 2020; Almeida *et al.*, 2025). Na prática, observa-se que muitos municípios ainda destinam esses resíduos a lixões ou aterros sanitários, sem tratamento adequado.

Adicionalmente, a prática da chamada “farmácia domiciliar”, caracterizada pelo armazenamento de medicamentos em residências para uso futuro, contribui para o aumento do volume de fármacos vencidos e seu descarte inadequado (Morretto *et al.*, 2020). A ausência de programas eficazes de conscientização e de sistemas acessíveis de coleta seletiva para medicamentos agrava esse cenário, elevando o risco de contaminação ambiental e intoxicações acidentais (Oliveira *et al.*, 2022; Bogo; Pugliese, 2024).

Apesar dos avanços científicos e regulatórios, ainda persistem lacunas significativas na compreensão integrada da ocorrência, comportamento ambiental e efeitos toxicológicos dos resíduos farmacêuticos, especialmente em países em desenvolvimento (Boxall *et al.*, 2012; Beek *et al.*, 2016). Diante disso, torna-se fundamental sistematizar o conhecimento disponível para subsidiar políticas públicas e estratégias de mitigação.

Assim, o presente estudo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura, conduzida conforme as diretrizes do protocolo PRISMA, a fim de analisar a presença de resíduos farmacêuticos no ambiente, seus impactos químicos e biológicos, bem como os potenciais riscos à saúde humana e ambiental.

2 MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa, com natureza descritiva e analítica, cujo objetivo foi reunir, analisar e discutir produções científicas relacionadas à presença de resíduos farmacêuticos no ambiente,

com ênfase em sua ocorrência em diferentes matrizes ambientais, comportamento químico, efeitos ecotoxicológicos e riscos potenciais à saúde humana.

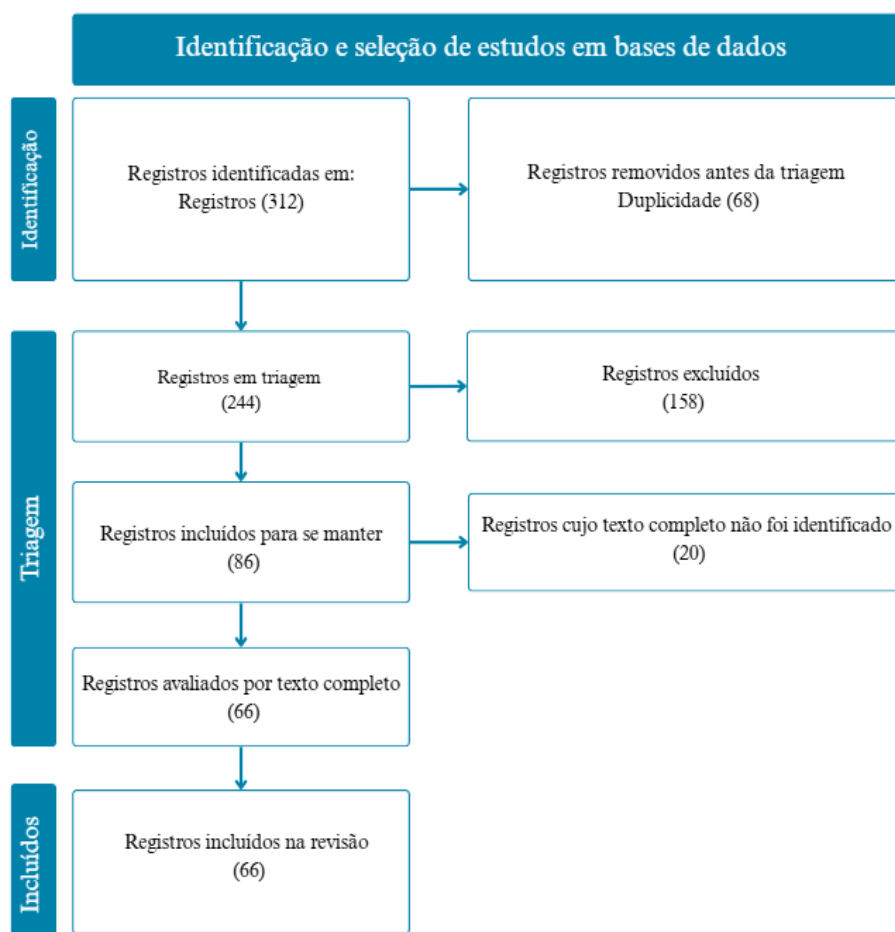
A escolha pela revisão de literatura justifica-se pela necessidade de compreender, à luz de diferentes estudos científicos, como os contaminantes farmacêuticos têm sido investigados no contexto ambiental, bem como identificar avanços, limitações e lacunas no conhecimento acerca de seus impactos químicos, biológicos e sanitários. Dessa forma, buscou-se sistematizar evidências produzidas em diferentes contextos geográficos e ambientais, contribuindo para uma análise crítica sobre a magnitude da poluição farmacêutica e suas implicações para a saúde pública e ambiental.

O percurso metodológico foi estruturado com base em pressupostos de revisões sistemáticas, considerando a importância do planejamento das etapas, da definição de critérios de seleção e da transparência na descrição dos procedimentos adotados. Para tanto, foram utilizados referenciais metodológicos voltados à organização de revisões científicas, os quais enfatizam o rigor na identificação, seleção e análise das produções, assegurando maior confiabilidade e reprodutibilidade aos resultados obtidos.

Além disso, o processo de levantamento e seleção dos estudos foi orientado pelas recomendações do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and* 5
Meta-Analyses) (Page et al., 2021), que contribui para a organização das etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos. A adoção desse protocolo favoreceu a sistematização das informações e a transparência do processo metodológico, possibilitando a replicação do estudo por outros pesquisadores.

O processo de identificação e seleção dos estudos seguiu as etapas recomendadas pelo protocolo PRISMA. Inicialmente, foram identificados 312 estudos nas bases de dados selecionadas. Após a remoção de duplicatas (n= 68), permaneceram 244 registros para triagem por título e resumo. Nessa etapa, foram excluídos 158 estudos por não atenderem aos critérios de inclusão. Em seguida, 86 artigos foram avaliados na íntegra, dos quais 20 foram excluídos por não apresentarem aderência temática ou qualidade metodológica adequada. Ao final, 66 estudos compuseram o corpus da revisão, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1- Fluxograma do processo de seleção dos estudos (PRISMA).



Fontes: Júnior *et al.*, 2026.

O delineamento metodológico também foi orientado por princípios de sistematização da literatura científica, que destacam a necessidade de seleção criteriosa das fontes e análise interpretativa das evidências disponíveis. Nesse sentido, foram identificados, selecionados e analisados estudos que abordam a ocorrência de resíduos farmacêuticos, seu comportamento ambiental, seus efeitos ecotoxicológicos e os riscos associados à saúde humana.

2.1 Estratégia de busca

O levantamento das produções científicas foi realizado em bases de dados de ampla relevância internacional nas áreas ambiental, química e biomédica, incluindo Scopus, Web of Science, PubMed e SciELO. Para ampliar o alcance da busca, foram utilizados descritores em

língua inglesa, selecionados com base em sua recorrência na literatura científica, combinados por meio de operadores booleanos (AND e OR). Entre os principais termos utilizados destacam-se “*pharmaceutical residues*”, “*emerging contaminants*”, “*environmental pollution*”, “*ecotoxicology*” e “*human health risks*”. O levantamento bibliográfico contemplou produções publicadas no período de 2000 a 2025, considerado relevante devido ao aumento expressivo de estudos sobre contaminantes emergentes. Adicionalmente, foi realizada busca manual nas referências dos artigos selecionados, com o objetivo de identificar estudos complementares.

2.2 Critérios de inclusão e exclusão

Para garantir a consistência da revisão, foram definidos previamente critérios de inclusão e exclusão dos estudos analisados. Foram incluídos artigos científicos completos, publicados em periódicos revisados por pares, que abordassem a presença de resíduos farmacêuticos em diferentes matrizes ambientais, como água, solo, sedimentos e efluentes, bem como estudos que apresentassem dados relacionados ao comportamento químico, efeitos ecotoxicológicos ou riscos à saúde humana. Também foram consideradas publicações nos idiomas inglês, português e espanhol, publicadas no período de 2000 a 2025. Por outro lado, foram excluídos estudos duplicados entre as bases de dados, trabalhos incompletos, resumos, editoriais e revisões não sistematizadas, além de publicações sem acesso ao texto completo ou que não apresentassem relação direta com o tema proposto. Estudos com insuficiência metodológica também foram desconsiderados, garantindo maior rigor científico na seleção do material analisado.

7

2.3 Processo de seleção dos estudos

O processo de seleção dos estudos ocorreu em etapas sucessivas. Inicialmente, os estudos foram identificados por meio das buscas realizadas nas bases de dados selecionadas. Em seguida, foi realizada a triagem preliminar a partir da leitura dos títulos e resumos, permitindo a exclusão de trabalhos que não apresentavam relação direta com a temática investigada. Posteriormente, os estudos considerados potencialmente relevantes foram submetidos à leitura na íntegra, com o objetivo de verificar sua adequação ao foco da pesquisa e sua contribuição científica. Ao final desse processo, foi definido o conjunto de estudos que compõem o corpus analítico da revisão.

2.4 Avaliação das produções selecionadas

Após a definição do corpus, realizou-se a análise qualitativa dos estudos incluídos, considerando aspectos como os objetivos das pesquisas, metodologias empregadas, tipos de matrizes ambientais analisadas, classes de fármacos investigadas e principais resultados obtidos. Também foram avaliados critérios relacionados à qualidade metodológica, incluindo clareza na descrição dos procedimentos, consistência dos dados apresentados e relevância científica dos estudos. Esse processo permitiu identificar padrões, tendências e lacunas na literatura, contribuindo para uma análise crítica e integrada das evidências disponíveis.

2.5 Procedimentos de análise e organização dos dados

As informações extraídas dos estudos selecionados foram organizadas em uma matriz padronizada contendo dados como autoria, ano de publicação, localização geográfica, matriz ambiental analisada, classes de fármacos identificadas, concentrações detectadas, métodos analíticos utilizados e efeitos ecotoxicológicos observados. A análise dos dados foi realizada por meio de categorização temática, permitindo a organização dos estudos em eixos principais, como ocorrência ambiental de resíduos farmacêuticos, comportamento químico e destino ambiental, efeitos ecotoxicológicos e riscos à saúde humana. A partir dessas categorias, foi elaborada uma síntese interpretativa das evidências encontradas, possibilitando a comparação entre diferentes estudos e a identificação de padrões globais e regionais. Dessa forma, o percurso metodológico adotado permitiu a construção de uma análise crítica, sistematizada e consistente sobre os impactos dos resíduos farmacêuticos no ambiente.

3 RESULTADO E DISCUSSÕES

3.1 Ocorrência de resíduos farmacêuticos em matrizes ambientais

A presença de resíduos farmacêuticos em águas superficiais e subterrâneas, solos e lodos de esgoto tem despertado preocupação devido aos seus potenciais impactos ambientais e à saúde humana, mesmo em baixas concentrações (Boger *et al.*, 2015). Esses micropoluentes apresentam características como persistência, atividade biológica e potencial de bioacumulação, que favorecem sua permanência no ambiente (Kümmerer, 2009). Sua introdução ocorre principalmente pelo descarte inadequado de medicamentos, excreção humana e animal e

lançamento de efluentes, sendo agravada pela limitada eficiência dos tratamentos convencionais de esgoto (Freitas; Radis-Baptista, 2021). O descarte no lixo comum ou na rede de esgoto contribui para a contaminação ambiental (Vieira, 2020), enquanto a insuficiência de políticas de logística reversa e educação ambiental intensifica o problema (Silva *et al.*, 2023).

No Brasil, antibióticos, hormônios e analgésicos já foram identificados em corpos hídricos (Boger *et al.*, 2015), inclusive em efluentes tratados, representando riscos para rios e aquíferos (Américo *et al.*, 2012). Em escala mundial, esses contaminantes também foram detectados em rios, lagos e água potável (Aus der Beek *et al.*, 2016), com níveis preocupantes sobretudo em áreas urbanizadas e países em desenvolvimento (Wilkinson *et al.*, 2022). Sua ocorrência também alcança o ambiente terrestre, especialmente pelo uso agrícola de lodos de esgoto, que pode introduzir antibióticos e hormônios no solo e afetar sua microbiota e organismos não alvo (Mejías *et al.*, 2021). A ampla distribuição desses resíduos está relacionada à introdução contínua e à estabilidade química (Pereira *et al.*, 2020), além da resistência aos tratamentos convencionais (Patel *et al.*, 2019).

Outro aspecto relevante é a formação de produtos de transformação, uma vez que processos físicos, químicos e biológicos podem gerar metabólitos ou subprodutos com toxicidade semelhante ou superior à dos compostos originais e potencial de bioacumulação (Maculewicz *et al.*, 2022). Entre os principais impactos associados estão alterações fisiológicas em organismos aquáticos, disfunções endócrinas e desequilíbrios ecossistêmicos, mesmo diante de baixas concentrações (Rivera-Jaimes *et al.*, 2018). A exposição contínua a antibióticos também pode favorecer a seleção de bactérias resistentes, ampliando os riscos à saúde pública (Patel *et al.*, 2019).

Por fim, esse cenário reforça a necessidade de políticas públicas voltadas à gestão e ao descarte adequado de medicamentos, associadas ao monitoramento ambiental e ao aprimoramento das tecnologias de tratamento. O enfrentamento da poluição farmacêutica exige ações integradas entre poder público, comunidade científica e sociedade para reduzir a entrada desses contaminantes no ambiente e seus impactos ambientais e sanitários (Wilkinson *et al.*, 2022).

3.2 Comportamento químico e destino ambiental

O comportamento dos resíduos farmacêuticos na natureza depende diretamente de suas propriedades químicas, como solubilidade e estabilidade. Esses fatores determinam como os compostos se movem, se fixam ou resistem à degradação em diferentes meios (Pereira *et al.*, 2020; Gworek *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2020). Muitos medicamentos possuem alta estabilidade, o que prolonga sua permanência nos ecossistemas aquáticos. Antibióticos, anti-inflamatórios e hormônios são os mais detectados em rios e estações de tratamento devido ao intenso consumo humano e veterinário (Pereira *et al.*, 2020).

A preocupação cresce porque os tratamentos de esgoto convencionais não eliminam totalmente essas substâncias. Segundo Oliveira *et al.*, (2020), fármacos como diclofenaco e carbamazepina continuam biologicamente ativos após o tratamento, sendo liberados em rios onde sua persistência e toxicidade variam conforme a temperatura e o pH da água. Além da água, o solo atua como um reservatório crítico. Gworek *et al.*, (2021) explicam que o uso de lodos de esgoto e a irrigação com águas residuárias levam esses compostos para a agricultura, onde o solo funciona como um filtro que pode transferir resíduos para as plantas ou águas subterrâneas.

Um aspecto alarmante é a formação de produtos de transformação. Ao sofrerem processos como fotodegradação ou oxidação, os fármacos originam metabólitos que podem ser mais tóxicos que a molécula original (Maculewicz *et al.*, 2022). Essa resistência à degradação é particularmente perigosa no caso dos antibióticos que, segundo Kümmerer (2009), permanecem ativos por longos períodos, favorecendo o desenvolvimento de bactérias resistentes.

O transporte desses poluentes também é facilitado pelo escoamento das chuvas e infiltração, especialmente em áreas com saneamento precário (Khan *et al.*, 2020). Entre os mais frequentes estão os anti-inflamatórios (AINEs), como o naproxeno e o ibuprofeno, que podem se acumular em organismos aquáticos e alterar processos fisiológicos de peixes e algas (Petrie; Camacho-Muñoz, 2021). No Brasil, o descarte incorreto no lixo ou esgoto doméstico, aliado à falta de programas de logística reversa, agrava essa dispersão (Freitas; Radis-Baptista, 2021).

Estudos reforçam que variáveis como matéria orgânica e atividade microbiana mudam a toxicidade desses compostos no meio ambiente (Schwarz *et al.*, 2021). Em última análise, essa contaminação interfere na reprodução de espécies e na saúde pública, tornando-se um desafio urgente para países em desenvolvimento (Silva *et al.*, 2023). Compreender essa interação

complexa entre química e ambiente é o passo fundamental para criarmos estratégias de tratamento e monitoramento mais eficientes.

3.3 Efeitos ecotoxicológicos em organismos aquáticos

A permanência de resíduos de medicamentos em águas naturais tornou-se uma preocupação científica central devido aos seus efeitos ecotoxicológicos. Esses compostos atingem rios, lagos e oceanos através do descarte incorreto, da excreção humana e animal e, principalmente, pela incapacidade das estações de tratamento de esgoto convencionais em eliminá-los totalmente (Wang *et al.*, 2021). Segundo Iqbal *et al.*, (2020), embora sejam detectados em concentrações mínimas, a presença ininterrupta desses resíduos expõe os organismos a riscos crônicos.

Wang *et al.*, (2021) destacam que esses produtos de cuidado pessoal (PPCPs) são altamente persistentes e podem causar alterações fisiológicas e comportamentais na fauna. Antibióticos, anti-inflamatórios, antidepressivos e hormônios são os contaminantes mais comuns, capazes de interferir diretamente no metabolismo e na reprodução dos animais aquáticos. Os antibióticos, especificamente, preocupam pela sua capacidade de promover o surgimento de bactérias super-resistentes em rios e estações de tratamento (Kovalakova *et al.*, 2020).

11

Em peixes, resíduos de antidepressivos e hormônios sintéticos afetam os sistemas endócrino e neurológico, alterando padrões de alimentação e reduzindo a capacidade reprodutiva (Punginelli; Maccotta; Savoca, 2024). Além disso, Parola *et al.*, (2022) evidenciam o processo de bioacumulação, onde esses fármacos são encontrados em tecidos de moluscos e crustáceos, subindo pela cadeia alimentar até atingirem predadores de topo. No caso dos anti-inflamatórios (AINEs), Petrie e Camacho-Muñoz (2021) afirmam que sua toxicidade permanece alta mesmo em doses reduzidas, afetando o equilíbrio bioquímico dos organismos.

Um desafio adicional é o efeito das misturas farmacêuticas; Pereira *et al.*, (2020) ressaltam que a exposição simultânea a vários remédios pode potencializar os danos celulares e genéticos. Organismos na base da cadeia, como algas, também são sensíveis, sofrendo interferências na fotossíntese e no crescimento (WANG *et al.*, 2021). Esse cenário é agravado pelas mudanças climáticas: Bethke *et al.*, (2023) demonstram que águas mais quentes e ácidas podem tornar esses medicamentos ainda mais tóxicos para a biota.

Estrada-Almeida *et al.*, (2024) reforçam que o problema não atinge apenas indivíduos isolados, mas compromete processos ecológicos inteiros, como a ciclagem de nutrientes. Samal *et al.*, (2026) acrescentam que muitos desses poluentes já são detectados em organismos consumidos por humanos, exigindo estratégias urgentes de remoção. Pereira *et al.*, (2020) alertam ainda para os efeitos subletais, que agem lentamente sobre os sistemas imunológico e hormonal, tornando os danos difíceis de perceber inicialmente.

Portanto a poluição farmacêutica é uma ameaça real à biodiversidade global. Apesar das limitações no monitoramento em diversos países (IQBAL *et al.*, 2020), o consenso científico aponta para a necessidade imediata de melhorar o tratamento de efluentes, fiscalizar o descarte de medicamentos e fortalecer as políticas públicas para proteger o funcionamento dos ecossistemas aquáticos.

3.4 Riscos potenciais à saúde humana

A presença de resíduos farmacêuticos no ambiente tem despertado crescente preocupação científica devido aos possíveis impactos à saúde humana associados à exposição contínua, mesmo em baixas concentrações. Estudos recentes demonstram que substâncias farmacologicamente ativas podem persistir em águas superficiais, sedimentos, solos e sistemas de abastecimento de água potável, favorecendo diferentes vias de exposição humana, como ingestão de água contaminada, consumo de alimentos irrigados com águas residuárias e contato indireto com ambientes contaminados (Fernandes *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2021).

A crescente presença de resíduos farmacêuticos nos ecossistemas aquáticos tem sido considerada uma das principais preocupações ambientais contemporâneas, especialmente devido à capacidade desses compostos de persistirem no ambiente e interagirem com diferentes organismos vivos. O aumento do consumo de medicamentos, associado ao descarte inadequado e à eficiência limitada dos sistemas convencionais de tratamento de esgoto, contribui diretamente para a introdução contínua dessas substâncias em corpos hídricos. Nesse contexto, diversos estudos têm demonstrado a ampla ocorrência de contaminantes farmacêuticos em águas superficiais, sedimentos e efluentes domésticos e hospitalares. Diferentes classes de fármacos, incluindo antibióticos, analgésicos, anti-inflamatórios, hormônios e antidepressivos, têm sido frequentemente detectadas em ambientes aquáticos, sendo consideradas

contaminantes emergentes devido à sua persistência ambiental e à remoção incompleta nos sistemas convencionais de tratamento de esgoto (Vasilachi *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2020).

A exposição prolongada a esses compostos pode representar riscos toxicológicos relevantes, especialmente em razão da bioacumulação e da interação entre diferentes substâncias presentes no ambiente. Estudos apontam que determinados resíduos farmacêuticos e compostos associados apresentam potencial de interferência endócrina, o que pode ocasionar alterações fisiológicas em organismos expostos (Aquino *et al.*, 2021). Além disso, determinados fármacos e seus metabólitos podem apresentar efeitos tóxicos em organismos expostos, ampliando as preocupações relacionadas aos impactos crônicos da exposição humana a misturas complexas de contaminantes ambientais (Zhou *et al.*, 2018; Vasilachi *et al.*, 2021).

Outro aspecto amplamente discutido na literatura refere-se à resistência antimicrobiana associada à presença de antibióticos no ambiente. A liberação contínua desses compostos em corpos hídricos e sistemas de esgotamento sanitário favorece processos seletivos em comunidades microbianas, contribuindo para o desenvolvimento e disseminação de microrganismos resistentes (Silva; Oliveira, 2020). Esse cenário é considerado um importante problema de saúde pública global, devido à crescente disseminação de microrganismos resistentes associada à presença de resíduos antimicrobianos no ambiente e à redução da eficácia terapêutica dos antibióticos utilizados no tratamento de infecções humanas e veterinárias (Fernandes *et al.*, 2021; Silva; Oliveira, 2020).

Além dos efeitos microbiológicos, estudos recentes sugerem que resíduos de fármacos psicoativos presentes no ambiente podem provocar alterações neurológicas e comportamentais em organismos expostos, levantando preocupações sobre possíveis impactos indiretos à saúde humana decorrentes da exposição ambiental prolongada (Kaushik; Thomas, 2019). Embora ainda existam lacunas científicas relacionadas aos efeitos em longo prazo e às concentrações efetivamente perigosas para humanos, os estudos reforçam a necessidade de monitoramento contínuo desses contaminantes e do fortalecimento de políticas públicas voltadas ao gerenciamento adequado de resíduos farmacêuticos e à melhoria dos sistemas de tratamento de efluentes (Coimbra; Escapa; Otero, 2021; Aquino *et al.*, 2021).

3.5 Eficiência limitada dos sistemas de tratamento

A crescente detecção de resíduos farmacêuticos em ambientes aquáticos evidencia limitações dos sistemas convencionais de tratamento de água e esgoto no Brasil. Compostos farmacologicamente ativos, como antibióticos, anti-inflamatórios e hormônios, podem não ser completamente removidos durante esses processos, favorecendo sua permanência em corpos hídricos e sistemas de abastecimento público (Aquino; Brandt; Chernicharo, 2013; Reis *et al.*, 2019). Segundo Aquino, Brandt e Chernicharo (2013), uma das principais vias de entrada desses contaminantes no ambiente é o lançamento de esgotos domésticos tratados ou in natura, tornando as estações de tratamento importantes pontos de liberação de micropoluentes no meio aquático.

A eficiência limitada dos tratamentos convencionais está relacionada às características físico-químicas dos fármacos, como estabilidade molecular e resistência aos processos biológicos utilizados nas estações. Estudos em sistemas brasileiros demonstraram que reatores anaeróbios do tipo UASB e outras tecnologias simplificadas apresentam eficiência variável na remoção desses compostos, permitindo sua permanência nos efluentes tratados (Brandt *et al.*, 2013). Nesse sentido, Aquino, Brandt e Chernicharo (2013) destacam que a remoção depende das propriedades de cada substância, das condições operacionais e do tipo de tratamento empregado, podendo ser insuficiente para diferentes micropoluentes emergentes.

Em Minas Gerais, análises realizadas em sistemas convencionais de tratamento identificaram resíduos farmacêuticos em águas superficiais e destinadas ao consumo humano, incluindo betametasona, fluconazol, atorvastatina e prednisona (Reis *et al.*, 2019). As concentrações e a eficiência de remoção apresentaram variações entre os compostos e ao longo do ano, reforçando as limitações dos métodos convencionais e a necessidade de tecnologias complementares (Reis *et al.*, 2019).

Nesse contexto, tecnologias baseadas em membranas apresentam maior potencial para a remoção de resíduos farmacêuticos quando comparadas aos processos biológicos tradicionais (Carvalho *et al.*, 2022). Entretanto, sua implementação em larga escala ainda enfrenta desafios relacionados aos custos operacionais, à necessidade de infraestrutura especializada e às limitações técnicas, sobretudo em países em desenvolvimento. Dessa forma, a persistência desses contaminantes nos efluentes tratados reforça a necessidade de modernização das estações

de tratamento, ampliação do monitoramento ambiental e fortalecimento de políticas públicas destinadas ao gerenciamento de micropoluentes emergentes (Aquino; Brandt; Chernicharo, 2013; Reis *et al.*, 2019).

3.6 Resistência antimicrobiana associada a fármacos ambientais

A resistência antimicrobiana (RAM) associada à presença de fármacos no ambiente constitui uma importante ameaça à saúde pública e à integridade dos ecossistemas. A introdução contínua de antimicrobianos em corpos hídricos, decorrente do uso na medicina humana, veterinária e na agropecuária, favorece a seleção de microrganismos resistentes. Esses compostos são frequentemente detectados em efluentes domésticos, hospitalares e industriais, onde exercem pressão seletiva sobre as comunidades microbianas e favorecem a sobrevivência e proliferação de cepas resistentes (Kümmerer, 2009; Michael *et al.*, 2013; Paz, 2023).

A contaminação ambiental também contribui para a formação de reservatórios de genes de resistência, denominados resistoma ambiental. Esses genes podem ser disseminados entre diferentes espécies bacterianas por mecanismos de transferência horizontal, envolvendo elementos genéticos como plasmídeos, integrons e transposons (Berendonk *et al.*, 2015; Paz, 2023). Além disso, a exposição contínua a concentrações subinibitórias de antimicrobianos, encontradas em ambientes aquáticos e terrestres, pode favorecer mecanismos adaptativos e aumentar a diversidade genética relacionada à resistência (Kümmerer, 2009; Noronha, 2023). Dessa forma, o ambiente assume papel relevante na seleção, manutenção e disseminação da resistência antimicrobiana.

A RAM apresenta caráter multifatorial, estando relacionada ao uso excessivo ou inadequado de antimicrobianos, ao descarte incorreto de medicamentos e à contaminação ambiental. A magnitude do problema é evidenciada pelas estimativas de que, em 2019, aproximadamente 4,95 milhões de mortes estiveram associadas à resistência bacteriana em todo o mundo (Murray *et al.*, 2022; Paz, 2023). Nesse cenário, as estações de tratamento de efluentes constituem pontos de atenção, pois, embora reduzam a carga de poluentes, não removem completamente fármacos e microrganismos resistentes. Mesmo baixas concentrações de antimicrobianos podem favorecer a seleção de fenótipos resistentes e a transferência horizontal de genes (Michael *et al.*, 2013; Noronha, 2023).

No ambiente terrestre, a disseminação da resistência também está associada às atividades agrícolas, especialmente à aplicação de esterco e bio sólidos contendo resíduos farmacêuticos. Essa prática pode modificar as comunidades microbianas do solo e favorecer o enriquecimento de bactérias e genes de resistência, tornando o solo um importante reservatório ambiental de RAM (Sarmah *et al.*, 2006; Heuer *et al.*, 2011; Ferreira, 2025). No Brasil, esse cenário é agravado pelas desigualdades no acesso ao esgotamento sanitário, que contribuem para a liberação contínua de contaminantes no ambiente e demonstram a necessidade de melhorias estruturais e operacionais nos sistemas de saneamento (Brasil, 2000; SNIS, 2022; SNIS, 2023).

Diante desse panorama, são necessárias estratégias integradas para o monitoramento e controle da presença de fármacos no ambiente, incluindo o uso racional de antimicrobianos, o aprimoramento das tecnologias de tratamento de efluentes e políticas públicas voltadas ao descarte adequado de medicamentos. Por fim, o enfrentamento da resistência antimicrobiana requer ações coordenadas e multidisciplinares, fundamentadas no conceito de Saúde Única (One Health), considerando a relação entre saúde humana, animal e ambiental (Berendonk *et al.*, 2015; Murray *et al.*, 2022; Paz, 2023).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

16

A presente revisão sistemática evidenciou que a presença de resíduos farmacêuticos no ambiente representa um problema emergente de elevada relevância ambiental e sanitária. A análise dos estudos selecionados demonstrou ampla ocorrência desses contaminantes, principalmente em ambientes aquáticos, associada ao aumento do consumo de medicamentos, ao descarte inadequado e à limitada eficiência dos sistemas convencionais de tratamento de água e esgoto. Além disso, características como persistência, mobilidade e potencial de bioacumulação favorecem sua permanência nos ecossistemas e ampliam os riscos à biodiversidade.

Os estudos analisados também apontaram importantes efeitos ecotoxicológicos, incluindo alterações fisiológicas, comportamentais e reprodutivas em organismos aquáticos. Para a saúde humana, a exposição contínua a baixas concentrações desses compostos, por meio da água e de alimentos contaminados, constitui motivo de preocupação, especialmente pela presença de substâncias com potencial de desregulação endócrina e efeitos neurotóxicos. Destaca-se ainda a resistência antimicrobiana como uma das consequências mais preocupantes,

uma vez que a presença contínua de antibióticos no ambiente pode favorecer a seleção e disseminação de microrganismos resistentes.

Por fim, diante dos impactos identificados, torna-se fundamental fortalecer políticas públicas voltadas ao descarte e à gestão adequada de medicamentos, ampliar programas de logística reversa e investir em tecnologias mais eficientes para a remoção desses contaminantes. Também é necessário intensificar o monitoramento ambiental e desenvolver pesquisas sobre os efeitos da exposição prolongada e de misturas de diferentes fármacos. Nesse sentido, a adoção de estratégias integradas, fundamentadas no conceito de Saúde Única (One Health), mostra-se essencial para reduzir os impactos da poluição farmacêutica e promover a proteção conjunta da saúde humana, animal e ambiental.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. S. *et al.* Gestão de resíduos sólidos e impactos ambientais no Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 60, n. 2, p. 45–60, 2025.

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*, 2012.

AQUINO, Sérgio Francisco *et al.* Occurrence of pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in Brazilian water and the risks they may represent to human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Basel, v. 18, n. 22, p. 11765, 2021. DOI: 10.3390/ijerph182211765. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/22/11765>.

AQUINO, Sérgio F.; BRANDT, Emanuel M. F.; CHERNICHARO, Carlos A. L. Remoção de fármacos e desreguladores endócrinos em estações de tratamento de esgoto: revisão da literatura. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 3, p. 187–204, 2013. Disponível em: SciELO.

AUS DER BEEK, Tim *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>.

BEEK, T. A. D. *et al.* Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 35, n. 4, p. 823–835, 2016.

BERENDONK, T. U. *et al.* Tackling antibiotic resistance: the environmental framework. *Nature Reviews Microbiology*, v. 13, p. 310–317, 2015.

BETHKE, K. *et al.* Review of warming and acidification effects to the ecotoxicity of pharmaceuticals on aquatic organisms in the era of climate change. *Science of the Total Environment*, v. 877, p. 162829, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162829>.

BOGER, B.; TONIN, F. S.; ZAMORA, P. G. P.; WAGNER, R.; GOMES, E. C. Micro-poluentes emergentes de origem farmacêutica em matrizes aquosas do Brasil – uma revisão sistemática. *Ciência e Natura*, v. 37, n. 3, p. 725–739, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X18174>.

BOGO, Stéphanie Aparecida; PUGLIESE, Fabiana Sousa. O descarte incorreto de medicamentos e a falta de informação para a população. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 10, n. 7, p. 432–446, 2024.

BOXALL, A. B. A. *et al.* Pharmaceuticals and personal care products in the environment: what are the big questions? *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 367, n. 1604, p. 305–317, 2012.

BRANDT, Emanuel M. F. *et al.* Behaviour of pharmaceuticals and endocrine disrupting chemicals in simplified sewage treatment systems. *Journal of Environmental Management*, London, v. 128, p. 718–726, 2013. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.06.003. Disponível em: PubMed.

BRASIL. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e dá outras providências. Brasília, DF, 2000.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Brasília, DF, 2020.

18

CARVALHO, Fabio Pereira de *et al.* Remoção de fármacos com a utilização de membranas em efluentes de estações de tratamento de esgoto. 2022. Trabalho acadêmico – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: USP Repositório. Acesso em: 09 maio 2026.

COIMBRA, Ricardo N.; ESCAPA, Carla; OTERO, Marta. Removal of pharmaceuticals from water: conventional and alternative treatments. *Water*, Basel, v. 13, n. 4, p. 487, 2021. DOI: 10.3390/w13040487. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/4/487>.

DAUGHTON, C. G.; TERNES, T. A. Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change? *Environmental Health Perspectives*, v. 107, supl. 6, p. 907–938, 1999.

DEBLONDE, T.; COSSU-LEGUILLE, C.; HARTEMANN, P. Emerging pollutants in wastewater: a review of the literature. *Science of the Total Environment*, v. 409, n. 20, p. 4146–4166, 2011.

ESTRADA-ALMEIDA, A. G. *et al.* Pharmaceutical Pollutants: Ecotoxicological Impacts and the Use of Agro-Industrial Waste for Their Removal from Aquatic Environments. *Journal of Xenobiotics*, v. 14, n. 4, p. 1465–1518, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/jox14040082>.

FENT, K.; WESTON, A. A.; CAMINADA, D. Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, v. 76, n. 2, p. 122-159, 2006.

FERNANDES, Joana P. *et al.* Pharmaceutical compounds in aquatic environments—occurrence, fate and bioremediation prospective. *Toxics*, Basel, v. 9, n. 10, p. 257, 2021. DOI: 10.3390/toxics9100257. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2305-6304/9/10/257>.

FERREIRA, Paula Fernanda Alves. Resistência a antimicrobianos em solos e resíduos de origem animal sob uma perspectiva de saúde única. 2025. 144 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

FREITAS, L. D. A. A.; RADIS-BAPTISTA, G. Pharmaceutical pollution and disposal of expired, unused, and unwanted medicines in the Brazilian context. *Journal of Xenobiotics*, v. 11, n. 2, p. 61-76, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/jox11020005>.

GWOREK, B.; KIJEŃSKA, M.; WRZOSEK, J. *et al.* Pharmaceuticals in soil and plant environment: a review. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 232, p. 145, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04954-8>.

HEUER, H. *et al.* Antibiotic resistance gene spread due to manure application. *Current Opinion in Microbiology*, v. 14, n. 3, p. 236-243, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2011.04.009>

IQBAL, J. *et al.* Occurrence of pharmaceuticals in aquatic environment – a review. *Desalination and Water Treatment*, v. 184, p. 375-387, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25325>. 19

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

KAUSHIK, Gaurav; THOMAS, Michael A. The potential association of psychoactive pharmaceuticals in the environment with human neurological disorders. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, Amsterdam, v. 14, p. 100141, 2019. DOI: 10.1016/j.scp.2019.100141. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31453309/>. Acesso em: 09 maio 2026.

KHAN, H. K.; REHMAN, M. Y. A.; MALIK, R. N. Fate and toxicity of pharmaceuticals in the aquatic environment: an insight on their occurrence in South Asia. *Journal of Environmental Management*, v. 271, p. 111030, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111030>.

KOVALAKOVA, P. *et al.* Occurrence and toxicity of antibiotics in the aquatic environment: a review. *Chemosphere*, v. 251, p. 126351, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126351>.

KÜMMERER, K. Antibiotics in the aquatic environment – a review – part I. *Chemosphere*, v. 75, n. 4, p. 417-434, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.086>.

KÜMMERER, Klaus. *Pharmaceuticals in the environment: sources, fate, effects and risks*. 3. ed. Berlin: Springer, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74664-5>

LEMES, Erick de Oliveira; DE PAULA RODRIGUES DIAS, Aldineia; DE SOUZA, Caubir; LEONARDO NERES DE BARROS, Cícero; RICCIELE MENDES CAMARGO, Makaully. Consequências do Descarte Incorreto de Medicamentos. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 432-436, 2021. DOI: [10.17921/1415-6938.2021v25n4p432-436](https://doi.org/10.17921/1415-6938.2021v25n4p432-436).

MACULEWICZ, J. *et al.* Transformation products of pharmaceuticals in the environment: their fate, (eco)toxicity and bioaccumulation potential. *Science of the Total Environment*, v. 802, p. 149916, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149916>.

MEJÍAS, Carmen *et al.* Ocorrência de produtos farmacêuticos e seus metabólitos em lodo de esgoto e solo: uma revisão sobre sua distribuição e avaliação de risco ambiental. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, v. 30, e00125, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.teac.2021.e00125>.

MICHAEL, I. *et al.* Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of pharmaceuticals in the environment. *Water Research*, v. 47, n. 3, p. 957-995, 2013.

MORRETTO, Andressa Cristina *et al.* Descarte de medicamentos: como a falta de conhecimento da população pode afetar o meio ambiente. *Brazilian Journal of Natural Sciences*, v. 3, n. 3, p. 442-442, 2020.

MURRAY, C. J. L. *et al.* Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019. *The Lancet*, v. 399, n. 10325, p. 629-655, 2022.

NORONHA, Letícia Faria. Dinâmica da resistência bacteriana a fármacos antimicrobianos beta-lactâmicos e vancomicina em efluentes domésticos e água de rio. 2023. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

OLIVEIRA, M. *et al.* Pharmaceutical residues and xenobiotic contaminants: occurrence, analytical techniques and sustainable alternatives for wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, v. 705, p. 135568, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135568>.

OLIVEIRA, Talita Cristina de *et al.* A educação ambiental no estudo do descarte incorreto de medicamentos. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, v. 17, n. 4, p. 303-317, 2022.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 71, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

PAROLA, V. L. *et al.* Presence of pharmaceuticals and their metabolites in wild-living aquatic organisms: current state of knowledge. *Journal of Hazardous Materials*, v. 424, p. 127350, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127350>.

PATEL, M. *et al.* Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: chemistry, occurrence, effects, and removal methods. *Chemical Reviews*, v. 119, n. 6, p. 3510–3673, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00299>.

PAZ, N. T. C. Ocorrência de antimicrobianos e genes de resistência antimicrobiana em corpos de água no Brasil. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Microbiologia Clínica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

PEREIRA, A.; SILVA, L.; LARANJEIRO, C.; LINO, C.; PENA, A. Selected pharmaceuticals in different aquatic compartments: part I—source, fate and occurrence. *Molecules*, v. 25, n. 5, p. 1026, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25051026>.

PEREIRA, A. *et al.* Selected pharmaceuticals in different aquatic compartments: part II—toxicity and environmental risk assessment. *Molecules*, v. 25, n. 8, p. 1796, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25081796>.

PEREIRA, André *et al.* Assessment of human pharmaceuticals in drinking water catchments, tap and drinking fountain waters. *Applied Sciences*, Basel, v. 11, n. 15, p. 7062, 2021. DOI: 10.3390/app11157062. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/15/7062>. Acesso em: 09 maio 2026.

PETRIE, B.; CAMACHO-MUÑOZ, D. Analysis, fate and toxicity of chiral non-steroidal anti-inflammatory drugs in wastewater and the environment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 19, p. 43–75, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01065-y>.

PUNGINELLI, D.; MACCOTTA, A.; SAVOCA, D. Biological and environmental impact of pharmaceuticals on marine fishes: a review. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 12, n. 7, p. 1133, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12071133>.

QUEMEL, Gleicy Kelly China *et al.* Revisão integrativa da literatura sobre os resíduos de serviço de saúde, com enfoque em medicamentos, e as consequências do descarte incorreto. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 5, p. 45461–45480, 2021.

REIS, Eduarda O. *et al.* Occurrence, removal and seasonal variation of pharmaceuticals in Brazilian drinking water treatment plants. *Environmental Pollution*, Oxford, v. 250, p. 773–781, 2019. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.04.102. Disponível em: ScienceDirect. Acesso em: 09 maio 2026.

RIVERA-UTRILLA, J.; SÁNCHEZ-POLO, M.; FERRO-GARCÍA, M. Á.; PRADOS-JOYA, G.; OCAMPO-PÉREZ, R. Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water: a review. *Chemosphere*, v. 93, n. 7, p. 1268–1287, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.059>

SAMAL, K. *et al.* Pharmaceutical compounds and their toxicity to marine organisms: emerging contaminants and innovative strategies to reduce pharmaceutical pollution – a review and meta-analysis. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C*, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2026.110519>.

SARMAH, A. K. *et al.* Fate of antibiotics in the environment. *Chemosphere*, v. 65, n. 5, p. 725–759, 2006.

SCHWARZ, S.; GILDEMEISTER, D.; HEIN, A. *et al.* Environmental fate and effects assessment of pharmaceuticals for human use: lessons learned from regulatory data. *Environmental Sciences Europe*, v. 33, p. 68, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00503-0>.

SILVA, V. W. P. D. *et al.* Descarte de medicamentos e os impactos ambientais: uma revisão integrativa da literatura. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 28, n. 4, p. 1113–1123, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-81232023284.05752022>.

SILVA, Rafael Almeida da; OLIVEIRA, Beatriz Nascimento Lins de. Resistência a antimicrobianos: a formulação da resposta no âmbito da saúde global. *Saúde em Debate*, Rio de Janeiro, v. 44, n. esp. 4, p. 607–623, 2020. DOI: 10.1590/0103-11042020E406. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sdeb/a/8sybm7ZxDmzF8stXfY9KS/>. Acesso em: 09 maio 2026.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico temático: serviços de água e esgoto – visão geral. Brasília, DF, 2022.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. 25º diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2019. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento, 2020. 183 p.

VASILACHI, Ionela Cătălina *et al.* Occurrence and fate of emerging pollutants in water environment and options for their removal. *Water*, Basel, v. 13, n. 2, p. 181, 2021. DOI: 10.3390/w13020181. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/2/181>. 22

VIEIRA, Flávia Monaco. Pharmaceutical waste: environmental risks of improper disposal of medicines. *Natural Resources*, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 74–81, 2020. DOI: 10.6008/CBPC2237-9290.2021.001.0010.

WANG, Huan *et al.* Ecotoxicological effects, environmental fate and risks of pharmaceutical and personal care products in the aquatic environment: a review. *Science of the Total Environment*, v. 788, p. 147819, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147819>.

WILKINSON, John L. *et al.* Pharmaceutical pollution of the world's rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 119, n. 8, e2113947119, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2113947119>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). The evolving threat of antimicrobial resistance: options for action. Geneva: WHO, 2012.

ZHOU, Yaoyu *et al.* Chiral pharmaceuticals: environment sources, potential human health impacts, remediation technologies and future perspective. *Environment International*, Oxford, v. 116, p. 196–214, 2018. DOI: 10.1016/j.envint.2018.09.017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30292145/>