UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E BIOLÓGICAS BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

LAUREN GABRIELE RIBEIRO BERNEGOZZI

MICROPLÁSTICOS: A AMEAÇA INVISÍVEL. UMA REVISÃO CRÍTICA DA OCORRÊNCIA E DOS RISCOS DOS MICROPLÁSTICOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS

Sorocaba

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E BIOLÓGICAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

LAUREN GABRIELE RIBEIRO BERNEGOZZI

MICROPLÁSTICOS: A AMEAÇA INVISÍVEL. UMA REVISÃO CRÍTICA DA OCORRÊNCIA E DOS RISCOS DOS MICROPLÁSTICOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciências Biológicas, da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientação: Prof. Drª. Elisabete Alves Pereira

Sorocaba

2025

Bernegozzi, Lauren Gabriele Ribeiro

Microplásticos: A Ameaça Invisível. Uma revisão crítica da ocorrência e dos riscos dos microplásticos em ambientes aquáticos / Lauren Gabriele Ribeiro Bernegozzi -- 2025.
46f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Elisabete Alves Pereira
Banca Examinadora: Cleoni dos Santos Carvalho, Iolanda Cristina Silveira Duarte
Bibliografia

1. Microplásticos em ambientes aquáticos. I. Bernegozzi, Lauren Gabriele Ribeiro. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano - CRB/8 6979

FOLHA DE APROVAÇÃO

LAUREN GABRIELE RIBEIRO BERNEGOZZI

MICROPLÁSTICOS: A AMEAÇA INVISÍVEL. UMA REVISÃO CRÍTICA DA OCORRÊNCIA E DOS RISCOS DOS MICROPLÁSTICOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciências Biológicas, da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciências Biológicas. Avaliado em:

Sorocaba, 10 de dezembro de 2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dra. Elisabete Alves Pereira

Departamento de Física, Química e Matemática, CCTS - UFSCar

Prof. Dra. Cleoni dos Santos Carvalho

Departamento de Biologia, DBio - UFSCar

Prof. Dra. Iolanda Cristina Silveira Duarte

Departamento de Biologia, DBio – UFSCar

AGRADECIMENTOS

A jornada acadêmica é feita de escolhas, desafios e conquistas, mas, acima de tudo, é construída com o apoio e a presença de pessoas especiais que caminham ao nosso lado. Neste momento tão significativo da minha vida, quero expressar minha mais profunda gratidão.

A minha orientadora, minha sincera gratidão por todo o suporte, dedicação, paciência e valiosas orientações ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Seus conselhos, conhecimentos e incentivo foram fundamentais para o aprimoramento da pesquisa e para que este trabalho alcançasse sua melhor forma.

A Deus, minha eterna reverência, por me conceder a dádiva da vida, da saúde e da sabedoria. A Ele, que me fortaleceu nos momentos de cansaço, que me guiou diante das incertezas e me permitiu chegar até aqui com fé, coragem e perseverança.

À minha família, meu alicerce e porto seguro, agradeço por todo amor e incentivo. Em especial aos meus pais, Renata e Sandro, e minha irmã, Laís, que sempre acreditaram no meu potencial e nunca mediram esforços para me oferecer as condições necessárias para que eu pudesse estudar e me dedicar plenamente. O apoio, o sustento e a confiança que recebi de vocês foram fundamentais para que este sonho se tornasse realidade.

Ao meu noivo, Fábio, minha gratidão pelo carinho, pela paciência e pelo amor que sempre me ofereceu, mesmo nos períodos em que a rotina apertada e os desafios do TCC pareciam me consumir. Seu companheirismo e compreensão foram essenciais para que eu me mantivesse firme até o fim.

Aos professores, mestres que guiaram meu percurso acadêmico com sabedoria e generosidade, deixo meu sincero reconhecimento. Cada aula, cada orientação e cada troca de conhecimento contribuíram de forma única para minha formação pessoal e profissional. Graças ao aprendizado adquirido ao longo desses anos, hoje tenho a alegria de apresentar este trabalho.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória: meu muito obrigada.

RESUMO

BERNEGOZZI, L. G. R. Microplásticos: A Ameaça Invisível. Uma revisão crítica da ocorrência e dos riscos dos microplásticos em ambientes aquáticos. TCC (Graduação em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de São Carlos - campus Sorocaba, Sorocaba-SP, 2025.

Os microplásticos (MPs) têm sido amplamente reconhecidos como contaminantes emergentes, capazes de causar impactos significativos ao meio ambiente e à saúde humana devido à sua persistência, toxicidade e capacidade de adsorver diferentes poluentes. A ocorrência de MPs em diferentes etapas dos sistemas de tratamento de água e esgoto, evidencia que, embora esses processos representem barreiras importantes, ainda não são totalmente eficientes na remoção das partículas, contribuindo para a sua contínua liberação no ambiente. Os riscos associados envolvem desde efeitos físicos e químicos na biota aquática até potenciais consequências para a saúde pública, considerando a sua presença já detectada em água potável e em organismos humanos. Este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica atualizada sobre a presença, os efeitos e as estratégias de mitigação relacionadas aos microplásticos em ambientes aquáticos, com ênfase nos sistemas de tratamento de água e esgoto, além de avaliar a percepção de estudantes do Ensino Fundamental frente a essa problemática por meio de uma intervenção pedagógica informal sobre a temática. A análise da intervenção pedagógica evidenciou pouco conhecimento prévio dos estudantes acerca do tema e, após intervenção educativa com o uso de material didático informativo, observou-se aumento expressivo na compreensão dos impactos ambientais e na importância do descarte adequado de resíduos plásticos. Conclui-se, assim, que a poluição por microplásticos exige ações integradas que envolvam avanços tecnológicos nos sistemas de saneamento, regulamentação específica e estratégias de educação ambiental para a conscientização da sociedade. Dessa forma, este trabalho reforça a necessidade de ampliar discussões científicas e políticas voltadas ao controle da emissão de microplásticos e à promoção de práticas sustentáveis que mitiguem sua dispersão no ambiente aquático e os riscos à saúde humana.

Palavras-chave: Educação ambiental; Microplásticos; Recursos hídricos; Saúde pública; Saneamento.

ABSTRACT

BERNEGOZZI, L. G. R. Microplastics: The Invisible Threat. A critical review of the occurrence and risks of microplastics in aquatic environments. Undergraduate thesis (Bachelor's degree in Biological Sciences) – Federal University of São Carlos – Sorocaba campus, Sorocaba-SP, 2025.

Microplastics have been widely recognized as emerging contaminants with the potential to significantly impact both the environment and human health. This behavior is primarily due to their persistence, toxicity, and capacity to adsorb various pollutants. The presence of microplastics (MPs) at different stages of treatment processes indicates that, although these systems represent important barriers, they are not fully efficient in particle removal, contributing to their continued release into the environment. The associated risks encompass physical and chemical impacts on aquatic biota, as well as potential ramifications for public health, given their detection in drinking water and human organisms. This study aimed to conduct an updated literature review on the presence, effects, and mitigation strategies related to microplastics in aquatic environments, with emphasis on water and wastewater treatment systems, as well as to evaluate elementary school students' perceptions of this issue through an informal pedagogical intervention on the topic. The analysis of the outcomes demonstrated limited prior knowledge among students regarding microplastics, and following the educational intervention using informative didactic materials, a significant increase was observed in the understanding of environmental impacts and the importance of proper plastic waste disposal. In conclusion, addressing microplastic pollution requires a coordinated approach involving advancements in sanitation technologies, the establishment of specific regulations, and the implementation of environmental education strategies aimed at increasing public awareness. Therefore, this study reinforces the need to broaden scientific and political discussions focused on controlling microplastic emissions and promoting sustainable practices that mitigate their dispersion in aquatic environments and the associated risks to human health.

Keywords: Environmental education; Microplastics; Public health; Sanitation; Water resources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Interesse de pesquisa pelo termo “Microplastics in water” entre os anos de 2016 a 2025 obtido a partir da busca no Google Trends 11

Figura 2 – Evolução anual da produção mundial no período de 2018 a 2024. 12

Figura 3 - Distribuição da produção global de microplásticos referente ao ano de 2024 por tipo de polímero..... 14

Figura 4 – Representação esquemática das etapas de uma Estação de Tratamento de Esgoto e porcentagens de remoção de microplásticos durante o tratamento 27

Sumário

1 INTRODUÇÃO 10
2 REFERENCIAL TEÓRICO 14
2.1 Contextualização dos Plásticos e Microplásticos 14
2.2 Fontes e Geração de Microplásticos 16
2.2.1 Ocorrência em Ambientes Aquáticos 18
2.3 Impactos Ambientais e à Saúde 21
2.4 Tecnologias e Estratégias de Remoção 24
2.5 Tecnologias e Estratégias de Remoção 25
2.6 Legislação e Diretrizes 29
3 OBJETIVOS 31
3.1 Objetivos específicos 31
4 METODOLOGIA 31
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 33
5.1 O problema do microplástico 33
5.2 Desenvolvimento de um panfleto informativo 35
5.3 Intervenção pedagógica informal 37
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 39
REFERÊNCIAS 42

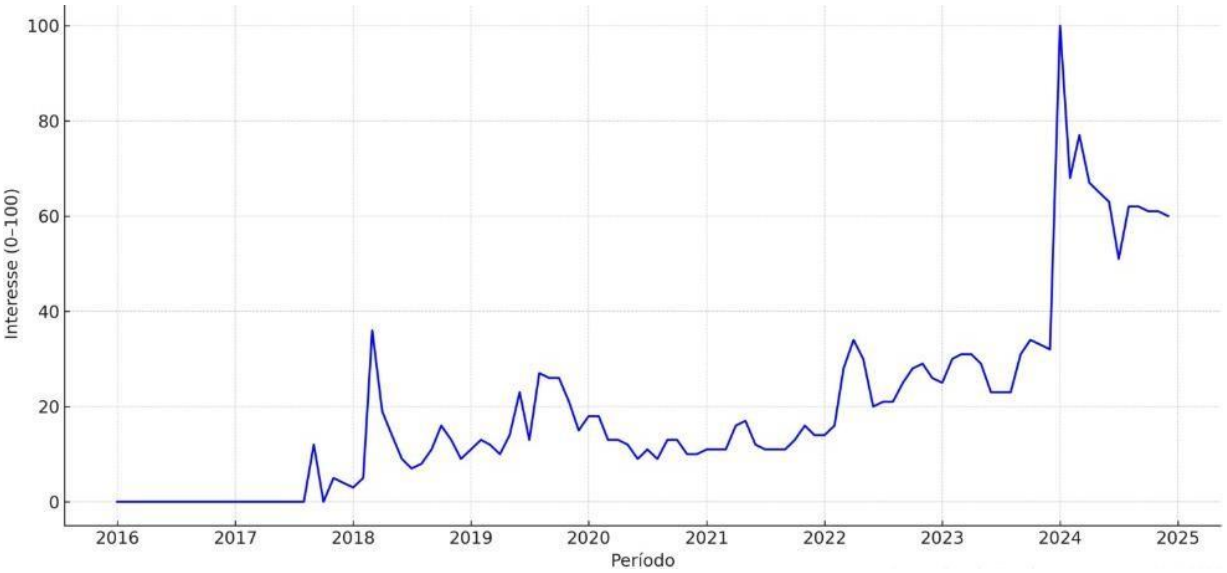
1 INTRODUÇÃO

A poluição por microplásticos (MPs) tornou-se um dos maiores problemas ambientais de hoje. Essas partículas plásticas, menores que 5 mm, podem ser produzidas de forma intencional (primários) ou surgirem da quebra de resíduos maiores (secundários). Elas estão presentes em praticamente todos os ambientes, como rios, lagos, oceanos, solos, ar e até mesmo na neve da Antártida (WALSH; CHANDRA, 2024). A presença desses poluentes é causada pelo aumento na produção de plásticos desde o meio do século XX, somado à baixa taxa de reciclagem e à capacidade desses materiais de persistirem no ambiente por muito tempo (DING et al., 2022; GAYER et al., 2017 apud WALSH; CHANDRA, 2024; DIKKO et al., 2020). Fei et al. (2019) mostraram que existem artigos sobre microplásticos publicados entre 1975 e 2019. Eles observaram que a quantidade de estudos sobre o tema cresceu a partir de 2016. Além disso, o número de artigos que mencionam a capacidade dos microplásticos de absorver substâncias também aumentou.

Os dados de interesse público sobre o termo *"microplastics in water"* foram obtidos na ferramenta Google Trends, considerando o período de janeiro de 2016 a dezembro de 2024. Os valores apresentados na Figura 1 estão em uma escala de 0 a 100, em que 100 corresponde ao pico de popularidade do termo dentro do intervalo analisado. Dessa forma, os indicadores não representam números absolutos de buscas, mas sim a variação relativa do interesse ao longo do tempo.

A partir de 2016, ocorreu um aumento expressivo no interesse global pelo tema, com picos mais acentuados sobretudo após 2022, indicando maior atenção pública e científica às questões relacionadas à presença de MPs em ambientes aquáticos.

Figura 1 – Interesse de pesquisa pelo termo “Microplastics in water” entre os anos de 2016 a 2025 obtido a partir da busca no Google Trends



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado do Google Trends.

Essa tendência crescente é evidenciada na imagem, que mostra a evolução das buscas pelo termo no Google Trends, refletindo o crescimento da preocupação da sociedade em relação aos impactos ambientais e à contaminação da água por MPs.

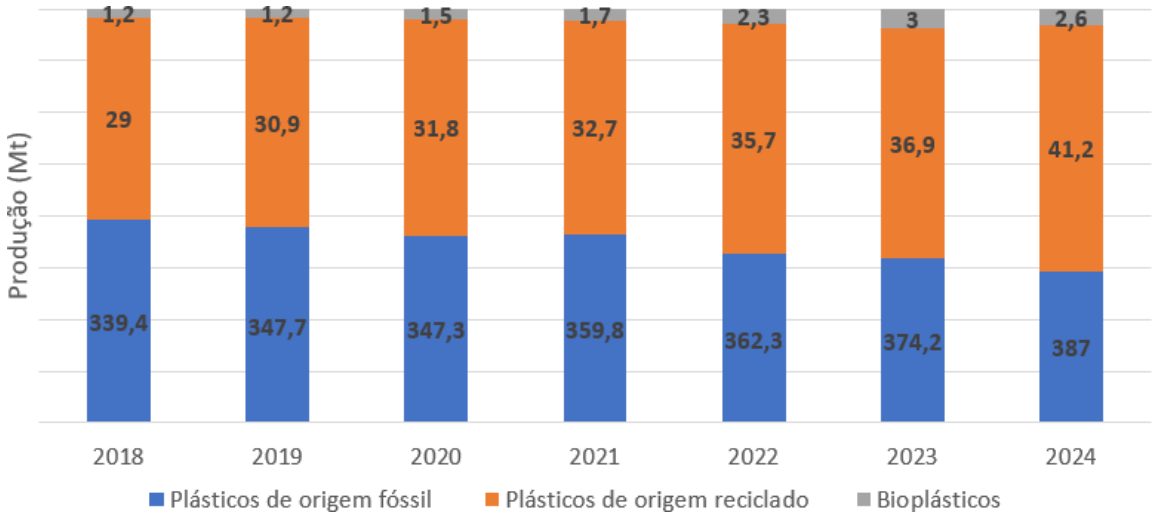
No que diz respeito ao tema hídrico, já foram registrados MPs em diferentes tipos de água, como águas superficiais, subterrâneas, costeiras e até mesmo em água potável. Isso mostra que os métodos tradicionais de tratamento de água não conseguem eliminar totalmente esses plásticos microscópicos (CAJTHAML et al., 2019; KYE et al., 2023). Estudos feitos em diversas regiões do Brasil confirmam a gravidade do problema. Por exemplo, na bacia do rio Paraíba do Sul, foram encontradas fibras de plástico em altas concentrações (ZALMON; COSTA; COSTA, 2023), enquanto em áreas costeiras, fatores como turismo, pesca e descarga de rios são apontados como principais responsáveis por essa contaminação (ESCROBOT et al., 2021). Esse cenário gera preocupações tanto ambientais quanto relacionadas à saúde humana, já que há evidências de que as pessoas estão ingerindo MPs por meio da água, dos alimentos e por contato direto (SOLE et al., 2025; HENRY; EVERAERT; VÖLKER, 2021).

Parte-se da hipótese de que a contaminação hídrica por MPs já é uma realidade consolidada em escala global e nacional, que os processos convencionais de tratamento de água apresentam limitações para removê-los completamente e que os riscos potenciais à saúde humana e ao equilíbrio ecológico tendem a se intensificar sem a adoção de medidas urgentes (SOLE et al., 2025; HENRY; EVERAERT; VÖLKER, 2021). Essa discussão é fundamental porque, além de expor os efeitos de um problema emergente ainda pouco regulamentado, contribui para o avanço científico e para a formulação de

políticas públicas voltadas à gestão de recursos hídricos (KYE et al., 2023; ESCROBOT et al., 2021).

O padrão de crescimento da produção científica apresentado na revisão de Fei et al. (2019) mostra o interesse por respostas sobre os microplásticos. É preciso mais estudos e desenvolvimento de métodos para entender melhor a origem, o comportamento e os efeitos desses poluentes no ambiente ao longo do tempo, assim como encontrar formas de reduzi-los.

Figura 2 – Evolução anual da produção mundial de plásticos no período de 2018 a 2024 de origens diferentes, em megatoneladas (Mt).



Fonte: Adaptado de Plastics Europe (2025).

Abaixo estão os principais tipos de plásticos e suas aplicações:

● PET (poli(tereftalato de etileno)) – é transparente, resistente, não absorve umidade e é leve. Por isso, é usado em embalagens de bebidas e alimentos, produtos de limpeza, farmacêuticos e cosméticos. Como pode ser aquecido, é usado na fabricação de bandejas para pratos prontos que podem ser colocados no micro-ondas. Também está presente em outros produtos, como fibras para tapetes e plásticos de engenharia.

● PEHD (Polietileno de alta densidade) – é resistente a químicos, à baixa temperatura, leve, impermeável e rígido. É usado em embalagens de alimentos, produtos têxteis, cosméticos, embalagens descartáveis, tampas de refrigerante, garrafas de água, brinquedos, eletrodomésticos, embalagens de produtos de limpeza, cerdas de escovas e vassouras, fitas adesivas e sacolas.

● PEBD (Polietileno de baixa densidade) – é leve, transparente e impermeável.
É usado na produção de filmes por causa da sua resistência, flexibilidade e transparência. Também é usado para impermeabilizar embalagens Tetra Pak e papel. É aplicado em caixas de refrigerante, fios e cabos de TV e telefone, filmes de uso geral, mangueiras, embalagens flexíveis, garrafas, fraldas e produtos higiênicos.

● PVC (Policloreto de vinila) – Tem ótima transparência, resistência química, é estável por muito tempo, resiste a mudanças de temperatura e tem boa estabilidade elétrica. Os produtos de vinil são divididos em rígidos e flexíveis. Os rígidos são usados em engenharia, como tubos e conexões, pisos e janelas, por causa da sua resistência. Os flexíveis são usados como isolamento em fios e cabos, como revestimento de pisos, em materiais sintéticos que imitam couro e em materiais médicos. Também são usados na produção de brinquedos, alguns tecidos, cartões de crédito, embalagens de alimentos e tanques de máquinas de lavar.

● PP (Polipropileno) – é resistente a químicos e a mudanças de temperatura, é brilhante, rígido e resistente. É usado na fabricação de embalagens e recipientes que resistem a líquidos quentes. É encontrado tanto em embalagens flexíveis quanto rígidas, em tecidos de fibras e tapetes, em peças grandes para a indústria automotiva e em produtos de consumo.

- PS (Poliestireno) - É um tipo de plástico que pode ser rígido ou produzido em forma de espuma. Ele é impermeável, duro, leve e transparente, mas é fácil de quebrar. É usado na fabricação de equipamentos médicos, embalagens de alimentos, produtos de laboratório, alguns componentes eletrônicos, materiais para construção civil e peças de automóveis.

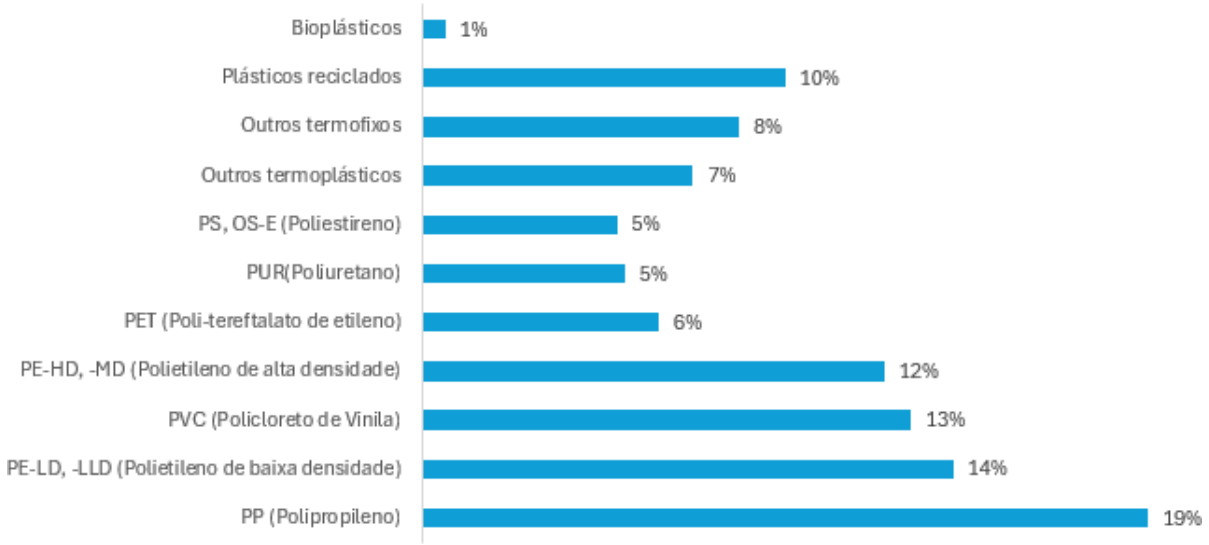
● PU (Poliuretano) - É um plástico muito versátil, disponível em várias formas e usado

em solados, laminados e forros sintéticos. As principais características são durabilidade, flexibilidade e leveza. É indicado para fabricação de tênis esportivos.

Entender qual tipo de polímero está presente nos ambientes aquáticos é muito importante, pois com essas informações é possível determinar como os plásticos se distribuem na coluna d'água e como interagem com os diferentes ecossistemas aquáticos.

Em relação à densidade, os plásticos de baixa densidade, aproximadamente 0,91 a 0,94 g/cm³, como o PP e o PE, têm densidade menor que a da água, o que os faz flutuar na coluna d'água, ficando disponíveis para as espécies pelágicas. Já os microplásticos que possuem maior densidade, aproximadamente 0,94 a 0,97 g/cm³, como o PET e o PS, tendem a ficar no fundo, ficando acessíveis aos organismos bentônicos (Issac; Kandasubramanian, 2021).

Figura 3 - Distribuição da produção global de microplásticos referente ao ano de 2024 por tipo de polímero.



Fonte: Adaptado de Plastics Europe (2025).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Contextualização dos Plásticos e Microplásticos

O surgimento dos plásticos no início do século XX representou uma das maiores revoluções tecnológicas da história, transformando hábitos de consumo, processos industriais e até mesmo a área da saúde (GADA et al., 2020). Produzidos a partir de derivados fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, esses polímeros conquistaram espaço por apresentarem características únicas, como leveza, resistência mecânica, durabilidade, facilidade de moldagem e baixo custo de produção (GADA et al., 2020). A partir da década de 1930, o desenvolvimento de resinas sintéticas como o polietileno e o polipropileno marcou a consolidação da produção em escala industrial. Nas décadas

seguintes, a expansão da indústria petroquímica potencializou a fabricação em larga escala, de modo que, já na década de 1990, a produção mundial de plásticos ultrapassou a de materiais tradicionais como o ferro e o alumínio, consolidando a chamada "era do plástico" (KYE et al., 2023).

O sucesso dos plásticos está diretamente ligado à sua versatilidade. Eles podem ser classificados, quanto à origem, em convencionais, quando derivados de combustíveis fósseis, e bioplásticos, quando produzidos a partir de matérias-primas renováveis, como milho, amido,

batata, cana-de-açúcar e óleos vegetais. Do ponto de vista térmico, distinguem-se em termoplásticos, que podem ser remodelados diversas vezes mediante aquecimento (como polietileno, polipropileno e PVC), termofixos, que adquirem forma definitiva após o processo de cura (como resinas epóxi e poliuretanos), e elastômeros, polímeros de caráter elástico que retornam à forma original após deformação, como a borracha sintética e o neoprene (GADA et al., 2020). Essas propriedades explicam sua ampla utilização e, ao mesmo tempo, estão na base dos problemas ambientais, já que a resistência à degradação faz com que resíduos plásticos persistam no ambiente por décadas ou até séculos (ZHANG et al., 2022).

A fragmentação progressiva desses resíduos, seja por processos físicos, químicos ou biológicos, dá origem a partículas cada vez menores, conhecidas como microplásticos. O termo, que passou a ter destaque a partir de 2004, quando estudos pioneiros identificaram essas partículas em ambientes marinhos, refere-se a fragmentos plásticos com dimensões inferiores a *5 mm* (KYE et al., 2023). De acordo com a literatura, os microplásticos podem ser classificados em primários, quando são fabricados intencionalmente em tamanhos microscópicos, como pellets industriais e microesferas presentes em cosméticos e produtos de higiene, e secundários, quando resultam da degradação de objetos plásticos maiores descartados no ambiente, como embalagens, garrafas e redes de pesca (SILVA et al., 2018; KYE et al., 2023).

Além dos microplásticos, também se destacam os nanoplásticos, partículas ainda menores, com dimensões inferiores a 1 μm, que apresentam riscos adicionais devido à maior facilidade de interação com sistemas biológicos. Estudos apontam que essas partículas podem atravessar barreiras celulares e desencadear efeitos como estresse oxidativo e processos inflamatórios, o que reforça a necessidade de mais pesquisas sobre seus impactos potenciais (HENRY; EVERAERT; VÖLKER, 2021).

A compreensão sobre o conceito de microplásticos também enfrenta dificuldades relacionadas à diversidade de polímeros, aditivos e tamanhos envolvidos. Organizações como a ISO e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) já estabeleceram definições, classificando os MPs como partículas sólidas de plástico

insolúveis em água com dimensões inferiores a 5 mm (ISO/TR 21960:2020; PNUMA, 2018). Contudo, ainda não há consenso absoluto quanto às faixas de tamanho, especialmente quando se considera a transição entre micro e nanoplásticos (KYE et al., 2023). Esse quadro reforça os desafios analíticos destacados por Silva et al. (2018), que apontam a heterogeneidade das amostras ambientais como uma das principais barreiras para o avanço científico nessa área.

Assim, a contextualização dos plásticos e microplásticos exige compreender que, embora os plásticos tenham se tornado indispensáveis no mundo contemporâneo, sua persistência no meio ambiente e a formação de partículas microscópicas representam um dos maiores desafios ambientais atuais. Os microplásticos simbolizam a dualidade desse material: de um lado, progresso e inovação tecnológica; de outro, resíduos de difícil controle, de grande persistência e com potenciais riscos à saúde humana e ao equilíbrio dos ecossistemas. Reconhecer esse cenário é fundamental para embasar as discussões que serão aprofundadas nos próximos capítulos, nos quais serão analisados suas fontes de geração, a ocorrência em ambientes aquáticos, os impactos ambientais e à saúde, bem como as tecnologias disponíveis para mitigação.

2.2 Fontes e Geração de Microplásticos

A literatura classifica os MPs em duas categorias principais**:** primários, quando são fabricados deliberadamente em pequenas dimensões, e secundários, quando resultam de processos de degradação de plásticos descartados no ambiente (Martins; Rodrigues; Tavares, 2023; Montagner et al., 2021). Essa distinção é fundamental para compreender os mecanismos de geração e a dispersão das partículas, uma vez que as fontes primárias e secundárias apresentam rotas distintas de emissão e contribuem de forma complementar para a crescente contaminação ambiental (Montagner et al., 2021). As fontes primárias incluem microesferas utilizadas em produtos cosméticos, de higiene pessoal e farmacêuticos, abrasivos industriais empregados em processos de polimento e limpeza, além de pellets de resina termoplástica que servem como matéria-prima para a fabricação de produtos plásticos (Escrobot et al., 2024; Kye et al., 2023). Também podem ser citados aditivos em tintas, fertilizantes de liberação controlada e até mesmo materiais de uso laboratorial. Essas partículas, por serem concebidas em escala microscópica, possuem alta mobilidade e frequentemente escapam das etapas de tratamento de águas residuais, alcançando diretamente corpos d'água e solos. Estima-se que até 35% dos MPs presentes nos oceanos sejam provenientes de fontes primárias (Zalmon; Costa; Costa, 2023).

Por sua vez, os microplásticos secundários correspondem à maior fração detectada

em ambientes aquáticos e terrestres. Eles derivam da fragmentação de plásticos maiores, como embalagens, sacolas, utensílios domésticos e materiais de pesca, que, uma vez descartados inadequadamente, passam por processos de degradação ambiental (Walsh; Chandra, 2024). Os principais mecanismos envolvidos são a fotodegradação por radiação ultravioleta, que rompe ligações químicas dos polímeros; a abrasão mecânica provocada por correntes de água, vento, transporte fluvial e

atrito com sedimentos; a degradação química, que ocorre em contato com oxidantes e poluentes; e as variações de temperatura, que aceleram a fragilização das cadeias poliméricas (Escrobot et al., 2024; Martins; Rodrigues; Tavares, 2023). Além disso, a colonização por microrganismos pode contribuir para a biodegradação parcial, ainda que esse processo seja lento e incompleto, dado o caráter recalcitrante da maioria dos polímeros sintéticos (Walsh; Chandra, 2024).

Um fator relevante nesse processo é que, à medida que os MPs envelhecem e se fragmentam, suas superfícies tornam-se mais rugosas, oxidadas e com maior área específica, aumentando a capacidade de adsorção de contaminantes. Estudos demonstram que MPs secundários podem fixar poluentes orgânicos persistentes, pesticidas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, metais e até microrganismos patogênicos, funcionando como vetores móveis de contaminação em diferentes ecossistemas (Martins; Rodrigues; Tavares, 2023). Essa característica amplia a complexidade do problema, pois os MPs não apenas representam um resíduo plástico de difícil degradação, mas também se convertem em plataformas de transporte de substâncias perigosas.

As atividades antrópicas exercem papel central na intensificação da emissão de MPs nos ecossistemas. Entre elas, destacam-se o turismo, que gera elevado descarte de plásticos em áreas costeiras; a pesca, que contribui com fibras sintéticas de redes e fragmentação de equipamentos; e o descarte inadequado de resíduos sólidos urbanos, que alimenta a degradação contínua de plásticos em aterros e ambientes naturais (Escrobot et al., 2024). Outros fatores, como o transporte fluvial, as descargas de rios e o escoamento urbano, também funcionam como importantes vetores de dispersão, transferindo MPs de ambientes terrestres para aquáticos e favorecendo seu acúmulo em regiões estuarinas e marinhas (Kye et al., 2023).

No contexto brasileiro, as pesquisas têm identificado a predominância de fibras sintéticas e fragmentos plásticos em rios tropicais, como o Paraíba do Sul, indicando que os efluentes domésticos e industriais, aliados à baixa taxa de reciclagem, são determinantes para a presença desses contaminantes (Zalmon; Costa; Costa, 2023). Esse padrão reforça a ideia de que a geração de MPs está diretamente ligada ao modelo de consumo linear do plástico, marcado pela produção em larga escala, uso intenso de itens

descartáveis e gestão inadequada de resíduos (Montagner et al., 2021).

Portanto, as fontes e mecanismos de geração de microplásticos podem ser entendidos como um processo dinâmico e contínuo, em que partículas primárias entram diretamente no ambiente por meio de atividades industriais e domésticas, enquanto partículas secundárias resultam da degradação progressiva de plásticos maiores já descartados. Essa dupla dinâmica assegura a onipresença dos MPs e evidencia a necessidade de políticas públicas que atuem tanto na regulamentação do uso de MPs primários em produtos comerciais quanto na mitigação da geração de MPs secundários, por meio de práticas mais sustentáveis de consumo, descarte e tratamento de resíduos (Martins; Rodrigues; Tavares, 2023; Escrobot et al., 2024; Kye et al., 2023).

2.2.1 Ocorrência em Ambientes Aquáticos

A presença de MPs em ambientes aquáticos é hoje considerada uma das maiores evidências do alcance global da poluição plástica. Os MPs foram inicialmente estudados em ambientes marinhos, mas atualmente há crescente preocupação com sua presença em ambientes de água doce e em sistemas de tratamento de água (KYE et al., 2023). Estudos realizados no Brasil demonstram que ecossistemas costeiros, como praias e manguezais, apresentam elevados níveis de MPs, principalmente devido à atividade turística e ao aporte de rios (ESCROBOT et al., 2024). Além do ambiente marinho, pesquisas indicam que MPs também estão presentes em águas subterrâneas e superficiais, podendo atingir sistemas de abastecimento público (KYE et al., 2023). A densidade, hidrofobicidade e resistência química dessas partículas favorecem sua persistência e dispersão no ambiente aquático (KYE et al., 2023).

A entrada desses contaminantes em corpos hídricos ocorre por diferentes rotas. A maior parte dos resíduos plásticos provém de atividades terrestres e chega aos rios e mares pelo escoamento superficial, drenagem pluvial, lançamento de efluentes domésticos e industriais, bem como pela disposição inadequada em lixões e aterros (ZHANG et al., 2022). A contribuição de atividades marítimas, como transporte, turismo e pesca, também é significativa, liberando fibras, fragmentos e até pellets diretamente no ambiente (NOVOTNA et al., 2019). Estima-se que aproximadamente 80% do lixo plástico encontrado nos oceanos tenha origem continental (MONTAGNER et al., 2021).

A ocorrência de MPs em ambientes aquáticos já foi amplamente documentada em diferentes regiões do mundo. Em águas superficiais, estudos realizados em rios da China, como o Yangtzé, registraram concentrações que variaram de 0,01 a $6,8 \times 10^6$ partículas/km² (ZHANG et al., 2022). Em lagos de água doce, como Taihu e Qinghai, a abundância chegou a centenas de milhares de partículas por quilômetro quadrado,

indicando que ambientes lacustres funcionam como áreas de acúmulo de MPs (ZHANG et al., 2022).

No ambiente marinho, observa-se a formação de zonas de acúmulo em grandes giros oceânicos, popularmente chamadas de “ilhas de plástico”. Essas áreas concentram fragmentos de macro e microplásticos transportados por correntes marinhas, criando verdadeiros depósitos a céu aberto que impactam amplamente a dinâmica oceânica (MONTAGNER et al., 2021).tudo, a dispersão não se limita às superfícies; MPs já foram identificados em colunas d’água profundas e até em sedimentos oceânicos, evidenciando sua persistência e capacidade de se acumular em diferentes compartimentos ambientais (HENRY et al., 2021).

Ambientes de água subterrânea também têm apresentado evidências de contaminação. Estudos realizados na Alemanha relataram menos de 1 partícula por metro cúbico em águas subterrâneas tratadas, indicando uma menor, mas ainda preocupante, ocorrência (MINTENIG et al., 2019 apud NOVOTNA et al., 2019). Ainda assim, a detecção mostra que a infiltração de MPs pelo solo é possível, principalmente em áreas urbanas e agrícolas onde há uso intensivo de plásticos.

Outro ponto crítico é a presença de MPs em águas destinadas ao consumo humano. Pesquisas realizadas na República Tcheca identificaram concentrações entre 338 e 628 partículas por litro em água tratada, revelando que os processos convencionais de coagulação, floculação e filtração não são totalmente eficazes na remoção, sobretudo das partículas menores que 20 µm (NOVOTNA et al., 2019). Essa constatação é reforçada por estudos que analisaram água engarrafada. De acordo com Mason et al. (2018) e Oßmann et al. (2018) foi encontrada nessas amostras, de diferentes marcas, desde dezenas até milhares de partículas por litro, inclusive em embalagens de vidro e caixas de papel, demonstrando que o próprio material da embalagem é fonte de liberação de MPs.

A ubiquidade desses contaminantes também foi confirmada em alimentos derivados do ambiente aquático, como frutos do mar e sal marinho, mas o ponto central é que as águas superficiais e subterrâneas funcionam como principais vetores de dispersão global dos MPs (NOVOTNA et al., 2019; ZHANG et al., 2022). Isso significa que rios, lagos e oceanos não apenas recebem a carga inicial de plásticos, mas também atuam como meios de transporte, levando-os para locais remotos. Estudos já comprovaram a presença de MPs em regiões polares, geleiras e até na neve, mostrando que as correntes aquáticas e atmosféricas são determinantes para sua distribuição planetária (HENRY et al., 2021).

Apesar do grande número de estudos, a comparação entre resultados ainda se mostra como um problema principalmente pela falta de padronização nos métodos de coleta, preparo e análise das amostras. Técnicas como filtração, digestão química e microscopia têm sido utilizadas, mas as diferenças nos limites de detecção e no tratamento

estatístico dificultam a consolidação de um panorama quantitativo global (MONTAGNER et al., 2021). Essa limitação metodológica pode explicar parte da grande variação encontrada entre diferentes estudos, reforçando a necessidade de protocolos harmonizados de monitoramento ambiental.

Outro aspecto relevante é que os MPs apresentam ampla diversidade de formas, cores, densidades e composições, como polietileno, polipropileno, poliestireno e PVC, o que influencia sua dispersão e comportamento ambiental (KHALID et al., 2021; HUANG et al., 2022). Partículas mais leves tendem a permanecer suspensas na coluna d'água, enquanto as de maior densidade acumulam-se em sedimentos. Essa característica contribui para que diferentes compartimentos aquáticos superfície, profundidade e fundo apresentem padrões de contaminação distintos.

Portanto, a ocorrência de microplásticos em ambientes aquáticos é ampla e multifacetada, abrangendo desde grandes massas oceânicas até mananciais de abastecimento humano. A complexidade do fenômeno exige a integração de estudos sobre origem, transporte e deposição desses contaminantes, para que se compreenda melhor sua dinâmica e se estabeleçam estratégias efetivas de monitoramento e mitigação. O que já se sabe, contudo, é que nenhum ambiente aquático está imune a essa forma de poluição, que representa um desafio emergente para a ciência, a gestão ambiental e a sociedade contemporânea.

2.3 Impactos Ambientais e à Saúde

Os MPs têm se consolidado como um dos principais poluentes emergentes do século XXI, representando um risco tanto para os ecossistemas quanto para a saúde humana. Por serem partículas extremamente pequenas, geralmente inferiores a 5 mm, e resistentes à degradação, acumulam-se nos ambientes aquáticos e terrestres, tornando-se onipresentes no planeta. Estudos recentes mostram que, além de seu impacto físico direto nos organismos, essas partículas possuem alta capacidade de adsorver compostos tóxicos e atuar como vetores de poluentes, agravando os efeitos ambientais e biológicos (Chandra; Walsh, 2024).

A presença de MPs em ambientes naturais tem provocado alterações ecológicas de diferentes magnitudes. Em ecossistemas aquáticos, essas partículas são facilmente ingeridas por peixes, moluscos, crustáceos e outros organismos, interferindo em processos vitais como alimentação, crescimento e reprodução (Chandra; Walsh, 2024). De acordo com Behera et al. (2021) a ingestão de microplásticos pode causar obstrução intestinal, redução da absorção de nutrientes e mortalidade em peixes expostos. Além dos danos físicos, os microplásticos desencadeiam reações bioquímicas importantes, como o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio e o estresse oxidativo, resultando

em danos celulares, genotóxicos e imunológicos (Huang et al., 2020).

Outro fator relevante é a função dos MPs como carreadores de poluentes. Essas partículas possuem alta área superficial e características hidrofóbicas, o que favorece a adsorção de metais potencialmente tóxicos, pesticidas e compostos orgânicos persistentes. No trabalho de Rout et al. (2022) foi possível observar que a interação entre microplásticos e metais como chumbo, cádmio e cobre intensifica a toxicidade aquática, uma vez que esses contaminantes podem ser liberados no trato digestório dos organismos após a ingestão. De modo semelhante, Li et al. (2021) relataram que partículas de polietileno modificam o comportamento de metais em solos, aumentando sua mobilidade e disponibilidade, o que potencializa os riscos ecotoxicológicos. Assim, os microplásticos não apenas causam danos físicos e fisiológicos, mas também amplificam os efeitos de outros poluentes já presentes no ambiente.

Além das interações químicas, os microplásticos alteram processos ecológicos essenciais. O acúmulo dessas partículas em sedimentos reduz a penetração de luz e oxigênio, comprometendo a fotossíntese de microalgas e a respiração de organismos bentônicos (Chen et al. (2022). Em ambientes terrestres, modificam propriedades físicas do solo, como porosidade e retenção de água, afetando o crescimento de plantas e a atividade microbiana. Esses efeitos cumulativos prejudicam a estrutura e a estabilidade dos ecossistemas, promovendo perda de biodiversidade e desequilíbrio nos ciclos biogeoquímicos (Li et al., 2021).

A preocupação com os MPs, no entanto, ultrapassa os limites ambientais e atinge a esfera da saúde humana. Pesquisas recentes confirmam a presença dessas partículas em diferentes compartimentos biológicos, incluindo sangue, pulmões, placenta e leite materno (Ragusa et al., 2021; Zhang et al., 2024). A principal via de exposição humana é a ingestão, por meio do consumo de alimentos contaminados e da água potável, embora a inalação de partículas suspensas no ar também represente um risco considerável (Urrutia-Pereira et al., 2021). Em ambientes urbanos, fibras têxteis sintéticas e poeira plástica podem ser inaladas e acumular-se no trato respiratório, provocando inflamação e estresse oxidativo nas vias aéreas (Amato- Lourenço et al., 2021).

Uma vez no organismo, partículas menores que 10 mm são capazes de atravessar barreiras biológicas e alcançar a corrente sanguínea, distribuindo-se para órgãos como fígado, rins e cérebro (Chandra; Walsh, 2024). Essa transferência sistêmica potencializa os riscos à saúde, pois os microplásticos e nanoplásticos podem interagir com células e tecidos, provocando alterações funcionais. Os principais mecanismos de toxicidade descritos incluem estresse oxidativo, inflamação crônica, disfunção mitocondrial, apoptose celular e alterações no microbioma intestinal (Miensah et al., 2022). Tais processos estão associados à liberação de aditivos e contaminantes adsorvidos, como

ftalatos e bisfenol A, reconhecidos como desreguladores endócrinos (Huang et al., 2020).

A toxicidade dos MPs também está relacionada à sua capacidade de atuar como vetores de microrganismos e genes de resistência antimicrobiana, o que pode favorecer o surgimento de infecções e reduzir a eficácia de tratamentos com antibióticos (Chen et al., 2022). Além disso, partículas ingeridas ou inaladas podem desencadear inflamações sistêmicas e desequilíbrios imunológicos. Estudos com modelos animais mostram que a exposição prolongada leva a danos hepáticos, disfunção intestinal e alterações no sistema endócrino (Miensah et al., 2022; Urrutia- Pereira et al., 2021).

Entre os efeitos mais preocupantes está a interferência dos microplásticos no sistema reprodutivo. Pesquisas recentes evidenciam que partículas de poliestireno e polietileno podem atravessar a barreira hemato-testicular e se acumular em tecidos reprodutivos masculinos (Oliveira et al., 2023). A exposição aos MPs está associada à redução da contagem e da motilidade espermáticas, além de causar fragmentação do DNA e alterações hormonais, como diminuição da testosterona (Oliveira et al., 2023). Os mecanismos propostos incluem o estresse oxidativo, o dano às membranas espermáticas e alterações epigenéticas, como metilação do DNA e modificação de histonas, capazes de afetar a espermatogênese e a fertilidade (Oliveira et al., 2023, Ragusa et al., 2021).

De forma semelhante, a presença de MPs na placenta humana (Ragusa et al., 2021), demonstra que essas partículas podem atravessar barreiras biológicas críticas e atingir o ambiente fetal, o que sugere potenciais efeitos no desenvolvimento embrionário. Mendes, Santos e Oliveira (2022) reforçaram em seu trabalho que a exposição prolongada a nano- e microplásticos pode provocar disfunções hormonais em ambos os sexos, interferindo no eixo hipotálamo-hipófise-gonadal e afetando a regulação hormonal, o metabolismo energético e o equilíbrio endócrino. Esses autores também destacam que a exposição crônica pode aumentar o risco de doenças metabólicas, como obesidade e resistência à insulina, devido à capacidade dessas partículas de atuar como mimetizadores hormonais.

A detecção de micro e nanoplásticos em sangue humano e tecidos demonstra que a exposição é contínua e inevitável. As partículas, uma vez absorvidas, podem se acumular ao longo do tempo e causar efeitos cumulativos ainda pouco compreendidos. Embora faltem estudos epidemiológicos robustos que correlacionem diretamente a exposição humana com doenças específicas, o conjunto de evidências experimentais aponta para riscos reais e crescentes Oliveira et al. (2023).

Dessa forma, a literatura científica é unânime ao reconhecer os microplásticos como poluentes persistentes, capazes de gerar impactos ambientais e sanitários de grande amplitude. No ambiente, comprometem funções ecológicas essenciais, alteram o equilíbrio biogeoquímico e promovem a bioacumulação de contaminantes. Na saúde

humana, a exposição contínua e multifatorial está associada a processos inflamatórios, disfunções hormonais e reprodutivas, além de possíveis efeitos epigenéticos (Oliveira et al., 2023).

Diante desse cenário, é fundamental fortalecer políticas públicas voltadas à redução da geração de plásticos, aprimorar a gestão de resíduos, incentivar alternativas biodegradáveis e desenvolver tecnologias eficazes de remoção de microplásticos em sistemas de tratamento de água e esgoto. Também se faz necessária a ampliação de estudos toxicológicos e epidemiológicos de longo prazo, que permitam compreender melhor os efeitos cumulativos dessas partículas.

Os microplásticos e nanoplásticos, portanto, configuram-se como contaminantes invisíveis, mas de impactos profundos, capazes de afetar tanto a integridade dos ecossistemas quanto a saúde das populações humanas. A integração entre políticas ambientais e de saúde pública torna-se indispensável para mitigar os danos já observados e prevenir consequências ainda mais graves nas próximas décadas.

2.4 Tecnologias e Estratégias de Remoção

As estações de tratamento de esgoto (ETEs) e de tratamento de água (ETAs) constituem componentes essenciais do saneamento básico, mas também representam uma das principais rotas de transporte e dispersão de MPs para ecossistemas aquáticos. Os MPs resultantes tanto da fragmentação de resíduos maiores quanto da liberação direta de partículas, estão sendo amplamente detectados em efluentes urbanos ao redor do mundo (Nguyen et al., 2019; Iyare et al., 2020).

A ocorrência de MPs nas águas residuais está intimamente associada ao estilo de vida moderno. O uso crescente de fibras sintéticas em roupas e tecidos faz com que a lavagem doméstica seja a maior fonte de MPs para as ETEs, sobretudo fibras de poliéster (PET) e poliamidas (PA), que se desprendem ao atrito mecânico das máquinas de lavar (Wu et al., 2019; Ngo et al., 2019). Já na indústria cosmética, microesferas de PE e PP antes utilizadas em produtos de cuidados pessoais também contribuíam significativamente, embora seu uso tenha diminuído após restrições legislativas em diversos países (Iyare et al., 2020).

As partículas que chegam às ETEs apresentam morfologias diversificadas, fibras, fragmentos, filmes, pellets e tamanhos que frequentemente se situam na escala de micrômetros, o que dificulta sua completa retenção nos sistemas de tratamento (Wu et al., 2021; Akyol et al., 2021). A composição polimérica predominante é de PE, PP, PET e PS, materiais menos densos que a água, o que favorece sua permanência em suspensão e reduz a eficiência de sua sedimentação (Wu et al., 2019; Nair & Reddy, 2022).

Considerando que as ETES não foram projetadas para remoção de MPs, elas conseguem remover, em média, entre 88% e 98% dos MPs, dependendo da etapa de tratamento à qual a água residual é submetida (Iyare et al., 2020; Wu et al., 2021), como ilustrado na Figura 4. A maior parte dessa remoção ocorre durante o tratamento primário, em que até 72% das partículas sedimentam associadas a sólidos suspensos, acumulando-se no lodo de esgoto (Iyare et al., 2020).

O tratamento secundário, baseado em floculação biológica no lodo ativado, é considerado a etapa mais eficiente de retenção, porque os MPs aderem às matrizes orgânicas formadas por biofilmes e agregados bacterianos (Wu et al., 2021; Dai et al., 2019).

Mesmo com tecnologias terciárias como filtração por membranas, flotação por ar dissolvido e ultrafiltração, ainda é comum a presença de partículas minúsculas, principalmente aquelas menores que 150 μm, que não sedimentam com facilidade e representam a maior preocupação ambiental devido ao seu comportamento coloidal (Iyare et al., 2020; Ngo et al., 2019). Assim, apesar de altas taxas percentuais de remoção, o grande volume diário de efluente lançado nos corpos d'água faz com que milhões de partículas continuem ingressando no meio aquático (Iyare et al., 2020; Nair & Reddy, 2022).

2.5 Tecnologias e Estratégias de Remoção

As estações de tratamento de esgoto (ETEs) e de tratamento de água (ETAs) constituem componentes essenciais do saneamento básico, mas também representam uma das principais rotas de transporte e dispersão de microplásticos (MPs) para ecossistemas aquáticos. Os MPs resultantes tanto da fragmentação de resíduos maiores quanto da liberação direta de partículas, estão sendo amplamente detectados em efluentes urbanos ao redor do mundo (Nguyen et al., 2019; Iyare et al., 2020).

A ocorrência de MPs nas águas residuais está intimamente associada ao estilo de vida moderno. O uso crescente de fibras sintéticas em roupas e tecidos faz com que a lavagem doméstica seja a maior fonte de MPs para as ETEs, sobretudo fibras de poliéster (PET) e poliamidas (PA), que se desprendem ao atrito mecânico das máquinas de lavar (Wu et al., 2019; Ngo et al., 2019). Já na indústria cosmética, microesferas de PE e PP antes utilizadas em produtos de cuidados pessoais também contribuíam significativamente, embora seu uso tenha diminuído após restrições legislativas em diversos países (Iyare et al., 2020).

As partículas que chegam às ETEs apresentam morfologias diversificadas, fibras, fragmentos, filmes, pellets e tamanhos que frequentemente se situam na escala de micrômetros, o que dificulta sua completa retenção nos sistemas de tratamento (Wu et al.,

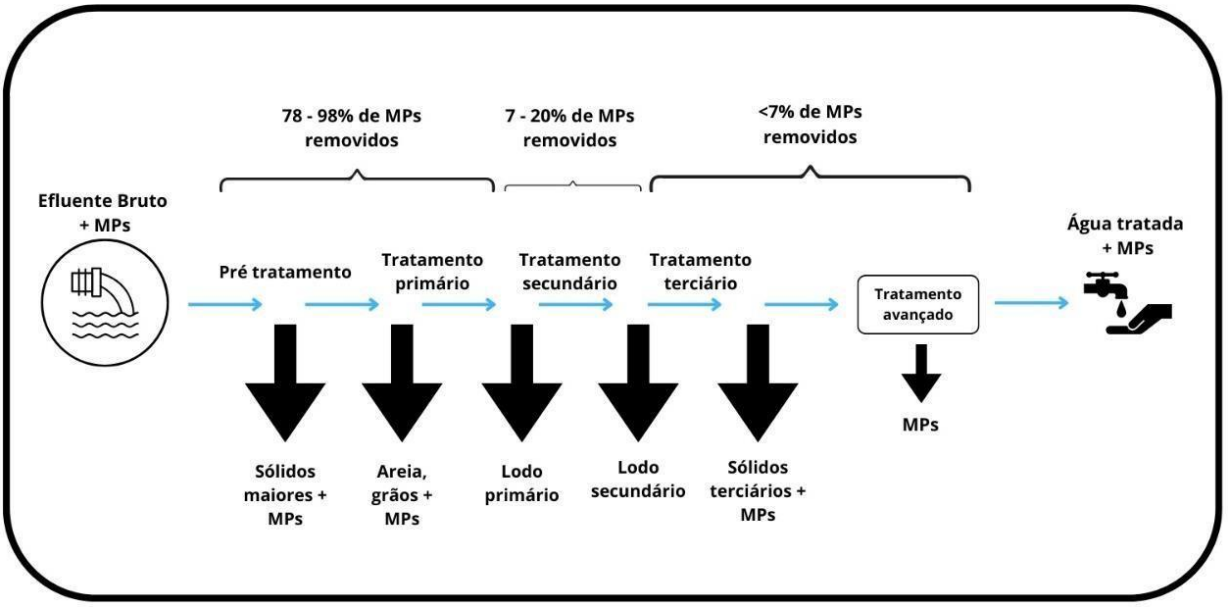
2021; Akyol et al., 2021). A composição polimérica predominante é de PE, PP, PET e PS, materiais menos densos que a água, o que favorece sua permanência em suspensão e reduz a eficiência de sua sedimentação (Wu et al., 2019; Nair & Reddy, 2022).

Considerando que as ETES não foram projetadas para remoção de MPs, elas conseguem remover, em média, entre 88% e 98% dos MPs, dependendo da etapa de tratamento à qual a água residual é submetida (Iyare et al., 2020; Wu et al., 2021), como ilustrado na Figura 4. A maior parte dessa remoção ocorre durante o tratamento primário, em que até 72% das partículas sedimentam associadas a sólidos suspensos, acumulando-se no lodo de esgoto (Iyare et al., 2020).

O tratamento secundário, baseado em floculação biológica no lodo ativado, é considerado a etapa mais eficiente de retenção, porque os MPs aderem às matrizes orgânicas formadas por biofilmes e agregados bacterianos (Wu et al., 2021; Dai et al., 2019).

Mesmo com tecnologias terciárias como filtração por membranas, flotação por ar dissolvido e ultrafiltração, ainda é comum a presença de partículas minúsculas, principalmente aquelas menores que 150 µm, que não sedimentam com facilidade e representam a maior preocupação ambiental devido ao seu comportamento coloidal (Iyare et al., 2020; Ngo et al., 2019). Assim, apesar de altas taxas percentuais de remoção, o grande volume diário de efluente lançado nos corpos d'água faz com que milhões de partículas continuem ingressando no meio aquático (Iyare et al., 2020; Nair & Reddy, 2022).

Figura 4 – Representação esquemática das etapas de uma Estação de Tratamento de Efluentes e porcentagens de remoção de MPs durante o tratamento.



Fonte: Adaptado de Masiá et al., 2020

Outro problema crítico é o destino do lodo gerado. Como grande parte dos MPs fica retida nessa fração, seu uso na agricultura pode introduzir MPs no solo, onde passam a interagir com organismos edáficos, seres que habitam ou dependem do solo em algum estágio do ciclo de vida, além de afetar processos de retenção de água e ainda serem transportados por escoamento ou infiltração rumo a ambientes aquáticos (Wu et al., 2019; Nair & Reddy, 2022). A utilização do lodo como adubo, portanto, deixa de ser solução para se tornar um vetor potencial de recirculação de MPs.

Outro problema é que os MPs podem interferir na eficiência operacional das ETEs. Estudos recentes apontam mudanças nas comunidades microbianas responsáveis pela degradação orgânica, redução das taxas de nitrificação e desnitrificação, além de maior incrustação em biorreatores de membrana (MBR) devido ao acúmulo de MPs, aumentando custos operacionais e frequência de manutenção (Yang et al., 2021; Akyol et al., 2021).

Para enfrentar esse problema, pesquisas vêm propondo tecnologias capazes de aprimorar a remoção ou mesmo a degradação de MPs no tratamento de águas residuais. Entre as estratégias mais promissoras destacam-se o uso MBR, filtragem nanométrica, processos eletroquímicos avançados e abordagens de biorremediação com organismos capazes de capturar ou degradar partículas plásticas (Masiá et al., 2020; Gitsov et al., 2021). No entanto, essas alternativas ainda demandam aperfeiçoamentos, especialmente quanto ao custo operacional, impacto energético e contenção biológica segura.

A literatura evidencia também a necessidade de padronização metodológica para quantificação de MPs em sistemas de tratamento, uma vez que diferentes técnicas analíticas, protocolos de amostragem e faixas granulométricas incluídas geram resultados não diretamente comparáveis (Dai et al., 2019; Akyol et al., 2021). Sem essa padronização, torna-se difícil estabelecer indicadores confiáveis de eficiência, riscos ambientais e limites legais.

A preocupação com a presença de MPs também se estende às ETAs, responsáveis pelo fornecimento de água potável às populações. Embora tradicionalmente focadas na remoção de partículas orgânicas e inorgânicas, essas unidades não foram projetadas para eliminar MPs, sobretudo aqueles com menor dimensão e maior mobilidade coloidal. Como consequência, os MPs podem persistir em diferentes etapas do tratamento, chegando ao sistema de distribuição e ao consumo humano (Iyare et al., 2020; Ngo et al., 2019).

Nas ETAs, os MPs presentes na água bruta podem ter como origem efluentes tratados a montante, descarte industrial, resíduos urbanos carreados pelo escoamento superficial e até liberação por desgaste de tubulações e estruturas hidráulicas, como válvulas e

revestimentos plásticos internos (Wu et al., 2021).

Assim, mesmo fontes de captação consideradas limpas, como mananciais superficiais protegidos, já apresentam contaminação detectável (Wu et al., 2021).

Os principais processos convencionais das ETAs, coagulação, floculação, decantação e filtração rápida, contribuem para reduzir parcialmente a carga de MPs, principalmente aqueles associados a partículas maiores ou agregados a flocos químicos (Dai et al., 2019). No entanto, partículas menores que 100 μm tendem a permanecer em suspensão, resistindo mesmo à filtração e à desinfecção final, podendo alcançar o sistema de distribuição sem alterações em sua estrutura ou toxicidade potencial (Ngo et al., 2019; Nair & Reddy, 2022).

Um outro aspecto a ser considerado e que muitas vezes é negligenciado é o papel das próprias instalações em gerar MPs secundários, devido à abrasão de membranas poliméricas, desgaste de peças de PVC e PEAD em tubulações pressurizadas, e degradação de materiais plásticos empregados em reservatórios e tanques de armazenamento (Wu et al., 2019). Ou seja, a ETA pode não apenas falhar em remover, mas também introduzir novas partículas no sistema.

Cabe mencionar que a presença de MPs em água potável é especialmente preocupante devido ao risco de exposição humana contínua, favorecida pelo consumo diário e prolongado ao longo da vida. Conforme destacado por Ngo et al. (2019) e Gitsov et al. (2021), MPs podem carrear aditivos químicos tóxicos e contaminantes adsorvidos, que incluem ftalatos, bisfenol A e patógenos aderidos à superfície, possibilitando transporte de poluentes emergentes e genes de resistência antimicrobiana para o organismo humano. Considerando os impactos toxicológicos causado pelos MPs, tecnologias avançadas vêm sendo estudadas para o aumento da eficiência de remoção de MPs em ETAs, como filtração em membranas de ultrafiltração e nanofiltração, flotação por ar dissolvido, irradiação UV combinada a processos oxidativos avançados e uso de membranas cerâmicas, estratégias que, apesar de altamente eficazes, ainda apresentam custo elevado para ampla aplicação (Masiá et al., 2020; Nair & Reddy, 2022).

Dessa forma, ETEs e ETAs exercem um papel ambíguo no ciclo dos microplásticos: embora funcionem como importantes barreiras tecnológicas capazes de reter grande parte dessas partículas durante seus processos operacionais, ainda representam fontes contínuas de liberação no ambiente, seja pela remoção incompleta e consequente emissão via efluentes, seja pela recirculação por meio do lodo de esgoto ou mesmo pela geração de novas partículas decorrentes do desgaste de materiais presentes nos próprios sistemas de tratamento. Assim, torna-se essencial investir no aprimoramento tecnológico dessas estruturas, na revisão normativa, na implementação de programas de monitoramento

contínuo e na transição para materiais e práticas mais sustentáveis, de modo a reduzir de forma efetiva a dispersão de microplásticos e proteger a qualidade dos recursos hídricos e da água destinada ao consumo humano (Iyare et al., 2020; Ngo et al., 2019).

2.6 Legislação e Diretrizes

O interesse mundial pelos efeitos ambientais e à saúde causados pelos MPs está levando a criação de regras e diretrizes internacionais. O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Internacional para Padronização (ISO) estão definindo termos, métodos de análise e sugestões para identificar e monitorar MPs em diversos tipos de ambientes (Kye et al., 2023). Entretanto, ainda não foi estabelecido um padrão global para os limites aceitáveis de MPs na água potável, o que mostra a necessidade de mais pesquisas e avanços regulatórios (Escrobot et al., 2024).

Atualmente, a maioria das regras está direcionada em proibir o uso intencional de microesferas plásticas em produtos de beleza e higiene pessoal, porque elas contribuem muito para a presença de partículas plásticas nas águas superficiais (Auta et al., 2017; Prata, 2018). Países como Estados Unidos, Reino Unido, Canadá e Irlanda já começaram a seguir essas regras.

Nos Estados Unidos, a Lei "Microbead-Free Waters Act" (2015) proibiu a produção e venda desses produtos, e essa regra foi implementada completamente em 2018 (H. Rept, 2015). Na União Europeia, a Agência Europeia de Produtos Químicos (ECHA) apresentou, em 2019, uma proposta para proibir a adição intencional de microplásticos em produtos, prevendo uma redução de 85 a 95% das emissões desse contaminante nos próximos 20 anos (ECHA, 2019). No mesmo ano, o Parlamento Europeu discutiu a restrição do uso do lodo de esgoto como fertilizante, com o objetivo de diminuir a dispersão de microplásticos que vêm das estações de tratamento (Parlamento Europeu, 2019). A União Europeia também passou a exigir o monitoramento de microplásticos na água para consumo humano, segundo uma diretriz estabelecida em 2020, com a elaboração prevista de um relatório completo até 2029 (União Europeia, 2020).

Apesar das mudanças nas regras em alguns países, estima-se que cerca de 245 toneladas de microplásticos ainda sejam lançadas anualmente no ambiente aquático (Auta et al., 2017), e até o momento não há uma regulamentação internacional específica sobre os limites aceitáveis, métodos padronizados para monitorar microplásticos na água potável ou controle da geração de microplásticos secundários.

No Brasil, a regulamentação ainda se restringe a produtos plásticos específicos, como proibições de canudos e sacolas plásticas em municípios e capitais (Buzo & Tecco, 2020), e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010) estabelece princípios como responsabilidade compartilhada e logística reversa para produtos

plásticos pós-consumo, visando a redução dos impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado (Brasil, 2010).

Entretanto, a legislação brasileira ainda não contempla diretamente a problemática dos MPs, não havendo definição de limites legais, critérios de monitoramento ou estratégias específicas de mitigação. O país ocupa a 4ª posição mundial na geração de resíduos plásticos, com cerca de 11 milhões de toneladas ao ano, mas apenas 23% dos municípios possuem coleta seletiva estruturada (Vargas et al., 2022; ANCAT, 2022).

Apesar de não haver uma lei federal específica sobre o tema, já existem algumas ações individuais. O Estado do Rio de Janeiro foi o primeiro a proibir a produção, venda e uso de produtos de higiene pessoal que contenham microplásticos, com a Lei nº 8.090/2018 (Rio de Janeiro, 2018). No âmbito internacional, surgiram também novas iniciativas, como a recomendação do Science Advisory Board (SAB) para que a EPA dos Estados Unidos inclua os MPs como substâncias reguladas, por causa da sua capacidade de absorver poluentes e dos riscos à saúde humana (EPA, 2022).

Diante da evidência científica crescente dos riscos associados à exposição contínua, torna-se urgente que o tema seja incorporado às políticas públicas ambientais, com a definição de parâmetros, protocolos de monitoramento e mecanismos de controle, assegurando a proteção dos ecossistemas e da saúde humana a curto e longo prazo (Karasik et al., 2023).

3 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica atualizada sobre a presença de microplásticos em ambientes aquáticos, abordando suas fontes e mecanismos de entrada, os efeitos adversos associados à biota e à saúde humana, bem como estratégias e tecnologias atualmente utilizadas para sua mitigação.

3.1 Objetivos específicos

Neste trabalho, buscou-se desenvolver um panfleto informativo destinado à educação ambiental, elaborado com linguagem acessível e conteúdo científico atualizado sobre a temática dos microplásticos. Esse material visa contribuir para a disseminação de informações claras, objetivas e visualmente atrativas, favorecendo a compreensão dos impactos ambientais associados aos MPs.

Adicionalmente, o estudo teve como propósito promover a sensibilização e observar, de forma geral, informal e descritiva, a compreensão de estudantes do Ensino Fundamental I acerca da temática dos microplásticos a partir de uma intervenção pedagógica informal com o uso do panfleto informativo.

4 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de abordagem mista, composta por uma revisão bibliográfica narrativa e uma pesquisa de campo de caráter exploratório e descritivo.

A primeira etapa do estudo consistiu em uma revisão bibliográfica narrativa, fundamentada na análise crítica de publicações científicas que abordam a presença, origem, geração e ocorrência de microplásticos em ambientes aquáticos. A pesquisa bibliográfica foi realizada entre os anos de 2017 e 2025, contemplando as bases de dados SciELO, Web of Science, Periódicos CAPES e Google Scholar, escolhidas por sua ampla cobertura e relevância acadêmica. Para garantir a abrangência da busca, foram utilizados descritores em português e inglês, isolados e combinados com operadores booleanos ("AND" e "OR"), tais como: *microplásticos*, *fontes de microplásticos*, *ocorrência em ambientes aquáticos*, *adsorção em microplásticos*, *contaminantes emergentes*, *plastic pollution* e *microplastics in aquatic environments*.

Foram incluídos na pesquisa artigos originais e revisões publicadas em periódicos revisados por pares, redigidos em português, inglês ou espanhol, que abordassem diretamente a temática proposta. Foram excluídos estudos duplicados, trabalhos sem revisão por pares, resumos de conferências, relatórios técnicos e publicações cujo foco não estivesse diretamente relacionado à presença e aos impactos dos microplásticos. Após a triagem inicial por meio da leitura de títulos e resumos, procedeu-se à leitura integral dos artigos selecionados, assegurando a relevância científica e metodológica dos estudos. A partir dessa etapa, os trabalhos foram organizados em categorias temáticas que permitiram compreender de maneira integrada as fontes, os mecanismos de geração, os impactos e a ocorrência dos microplásticos em diferentes ambientes.

A segunda etapa do estudo correspondeu a uma intervenção pedagógica informal, desenvolvida com o objetivo de promover a conscientização de alunos do Ensino Fundamental acerca da problemática dos microplásticos, bem como de observar, de forma geral, a compreensão dos estudantes antes e após o contato com um material educativo elaborado especificamente para esta pesquisa. Para essa intervenção, foi produzido um panfleto informativo por meio da plataforma Canva, utilizando linguagem simples, objetiva e adequada ao público infantojuvenil. O material abordou a definição de microplásticos, suas principais fontes, os impactos ambientais e à saúde humana, além de sugestões de atitudes cotidianas que contribuem para a redução da poluição plástica. O conteúdo foi elaborado com base nas informações obtidas na revisão bibliográfica, buscando traduzir conceitos científicos em mensagens acessíveis e ilustradas.

A aplicação do material educativo ocorreu em uma escola particular, envolvendo turmas do Ensino Fundamental I de 4º e 5º anos. A atividade foi conduzida de maneira

coletiva e informal, sem identificação individual dos participantes. Inicialmente, foram realizadas perguntas abertas e diálogos orientados com os alunos, com o intuito de estimular a reflexão e identificar percepções gerais sobre o tema. Em seguida, ocorreu uma explicação expositiva acompanhada da leitura e discussão do panfleto informativo, promovendo a troca de ideias e o esclarecimento de dúvidas.

Após a intervenção pedagógica informal, novas discussões orientadas foram realizadas, permitindo observar, de forma qualitativa e descritiva, uma ampliação da compreensão dos estudantes acerca dos impactos ambientais dos microplásticos e da importância do descarte adequado de resíduos plásticos. As percepções observadas ao longo da atividade foram registradas de forma descritiva e integrada, a partir da participação dos estudantes e das discussões coletivas realizadas durante a intervenção pedagógica informal.

Dessa forma, a metodologia adotada integrou o levantamento teórico e a aplicação prática de um recurso educativo, possibilitando não apenas a compreensão científica do tema, mas também a análise do potencial de estratégias pedagógicas informais na promoção da educação ambiental e na sensibilização de crianças e adolescentes frente a questões contemporâneas relacionadas à poluição e à sustentabilidade.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 O problema do microplástico

A crescente preocupação com a presença de MPs no meio ambiente e seus potenciais impactos à saúde humana justifica a relevância do tema abordado neste trabalho. Os MPs são poluentes persistentes, amplamente distribuídos nos ecossistemas aquáticos e capazes de atuar como vetores de contaminantes, como metais potencialmente tóxicos e compostos orgânicos tóxicos (Khalid et al., 2021; Chen et al., 2022). Estudos demonstram que esses contaminantes podem ser transferidos aos organismos aquáticos e bioacumular ao longo das cadeias alimentares, atingindo, consequentemente, os seres humanos (Henry et al., 2021; Miensah et al., 2022). Evidências recentes identificaram MPs até mesmo em tecidos humanos, como pulmões e placenta (Amato-Lourenço et al., 2021; Ragusa et al., 2021), reforçando que a exposição é real e contínua.

Muitos desses contaminantes chegam aos rios e lagos devido ao mau manejo inapropriado dos resíduos e ao uso excessivo de plásticos descartáveis, especialmente em países que têm dificuldades para reciclar e retornar os produtos ao sistema, como no Brasil, em que apenas 23% das cidades têm coleta seletiva formal (ANCAT, 2022; Vargas et al., 2022). Apesar de existirem leis como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), ainda não há legislação vigente sobre MPs na água ou no meio

ambiente, o que gera um cenário de falta de regulamentação e risco de contaminação.

Mesmo os sistemas de abastecimento e tratamento de água considerados seguros e potáveis vêm sendo apontados como potenciais rotas de exposição humana aos MPs. Estudos descritos na literatura, detectam essas partículas tanto em água bruta quanto em água tratada, evidenciando que as ETAs atuam como barreiras apenas parciais (Pivokonsky et al., 2018; Novotna et al., 2019; Li et al., 2022). Nas ETEs, embora a remoção possa alcançar mais de 90%, o volume elevado de efluentes gerados resulta em milhões de partículas sendo liberadas diariamente nos corpos receptores (Dai et al., 2019; Wu et al., 2021; Nair; Reddy, 2022). Além disso, o lodo produzido pode reintroduzir os MPs no ambiente quando aplicado como fertilizante, ampliando a dispersão terrestre e hídrica (Auta et al., 2017; Behera et al., 2021).

Apesar da relevância dos MPs, os desafios para identificar e contar partículas tão pequenas continuam sendo um grande problema, pois os métodos de análise ainda não são completamente padronizados ou sensíveis o suficiente para capturar todas as formas, tamanhos e composições dos MPs encontrados em ambientes complexos (Silva et al., 2018; Montagner et al., 2021). Os desafios incluem a dificuldade em detectar nanoplásticos, que quase não são vistos com as técnicas comuns, e o alto custo de tecnologias avançadas, como a espectroscopia Raman e FTIR, que são importantes para estabelecer com certeza a composição química (Novotna et al., 2019; Li et al., 2022).

Um outro fator importante é a tendência de subestimar MPs muito pequenos ou transparentes, que passam despercebidos nas etapas de filtragem e triagem (Pivokonsky et al., 2018). Por isso, a falta de regras comuns dificulta comparar os resultados entre estudos e atrapalha a criação de diretrizes globais para monitorar a contaminação por MPs (ISO, 2020; Karasik et al., 2023). Padronizar métodos sensíveis, confiáveis e que a comunidade científica compreenda é essencial para diagnosticar e controlar melhor a poluição por MPs.

Diante dessas evidências, observa-se a necessidade urgente de políticas e tecnologias que avancem na prevenção da formação de MPs, especialmente os secundários, oriundos da degradação de materiais plásticos de uso cotidiano, e no monitoramento sistemático desses contaminantes em ETAs, ETEs e redes de distribuição de água (Karasik et al., 2023; Gonçalves et al., 2023). A literatura é unânime ao afirmar que o melhor caminho é reduzir o uso de plásticos descartáveis e promover educação ambiental para modificações comportamentais (Buzo; Tecco, 2020; Montagner et al., 2021).

Nesse contexto, a educação ambiental, contemplando o tema dos microplásticos nas populações mais jovens, torna-se uma estratégia essencial. A escola desempenha papel central ao formar cidadãos críticos e conscientes sobre os impactos ambientais decorrentes de suas escolhas de consumo (Ferreira; Lima; Santos, 2017). Ao conhecerem

as fontes dos MPs, como o descarte incorreto de embalagens, o desgaste de têxteis sintéticos e o uso de produtos com microesferas, os estudantes podem mudar atitudes e agir como multiplicadores de informação (Souza; Oliveira, 2015; Mendes; Santos; Oliveira, 2022).

Os resultados obtidos no presente trabalho reforçam essa relação entre conhecimento e ação ambiental. Após a aplicação do material educativo proposto, observou-se aumento no entendimento dos alunos sobre os MPs, suas rotas de contaminação e os riscos associados à saúde humana e aos ecossistemas aquáticos. Esse ganho indica contribuição efetiva para suprir lacunas de informação que ainda persistem, dado que o tema permanece pouco difundido em materiais didáticos tradicionais (Martins; Rodrigues; Tavares, 2023).

Logo, a discussão integrada entre ciência ambiental e educação demonstra que o enfrentamento da poluição por MPs depende tanto do avanço tecnológico e normativo quanto da transformação social baseada em conhecimento. A formação ambiental crítica da população é, portanto, fundamental para reduzir a geração de MPs e mitigar seus impactos futuros, garantindo proteção à saúde pública e aos recursos hídricos.

5.2 Desenvolvimento de um panfleto informativo

Como mencionado anteriormente, o principal objetivo do panfleto informativo (Anexo I) foi promover a conscientização dos participantes acerca da problemática dos microplásticos, apresentando suas principais fontes, os efeitos associados ao meio ambiente e à saúde humana, bem como possíveis formas de mitigação. O material foi elaborado com linguagem simples, caráter educativo e apresentação visual atrativa, sendo utilizado como recurso pedagógico durante a intervenção pedagógica informal. Dessa forma, o panfleto atuou como instrumento de apoio ao processo de ensino e aprendizagem, favorecendo a reflexão e a assimilação dos conteúdos abordados, indo além da simples transmissão de informações.

A escolha do panfleto como recurso educativo fundamentou-se em sua reconhecida eficácia na comunicação de temas ambientais e científicos de forma clara, direta e acessível. De acordo com Silva e Rodrigues (2018), materiais impressos ou digitais são amplamente utilizados na educação ambiental por possibilitarem a transmissão rápida de informações, apresentarem baixo custo e alcançarem um público diversificado. Esses recursos contribuem para despertar o interesse da população ao combinarem linguagem acessível, elementos visuais e conteúdos relevantes, facilitando a compreensão e o engajamento com a temática. Souza e Oliveira (2015) também destacam o panfleto como uma ferramenta eficaz para a sensibilização da sociedade, especialmente quando

elaborado com design atrativo e linguagem que favoreça a conexão com o leitor.

O panfleto foi desenvolvido por meio da plataforma Canva, uma ferramenta digital que possibilita a criação de materiais visuais de forma prática e intuitiva. Essa plataforma foi escolhida em razão da variedade de recursos gráficos disponíveis, permitindo a integração harmoniosa de textos, imagens e ícones. O conteúdo apresentado foi fundamentado em estudos científicos e materiais de referência utilizados ao longo do trabalho, sendo adaptado para uma abordagem didática e acessível, com o objetivo de facilitar a compreensão por um público não especializado ou em processo de aprendizagem.

De forma objetiva e organizada, o panfleto abordou os principais aspectos relacionados aos microplásticos. Inicialmente, apresentou a definição do termo, destacando que se trata de partículas plásticas com diâmetro inferior a 5 mm, amplamente presentes em ambientes aquáticos, como rios e oceanos. Em seguida, foram evidenciadas as principais fontes desses poluentes, incluindo embalagens plásticas, produtos de higiene pessoal, pneus e tecidos sintéticos, ressaltando como o uso cotidiano desses materiais contribui para a liberação de microplásticos no ambiente. O material também destacou os impactos negativos dessas partículas sobre os organismos aquáticos e a cadeia alimentar, utilizando ilustrações para demonstrar o processo de ingestão por crustáceos, peixes e, consequentemente, seres humanos. Por fim, o panfleto apresentou sugestões de ações simples e cotidianas que podem contribuir para a redução da poluição plástica, como o descarte adequado de resíduos, o consumo consciente e a adoção de práticas sustentáveis.

Na sua elaboração, buscou-se equilibrar texto e imagens, utilizando cores atrativas e ilustrações que tornassem o conteúdo mais dinâmico e de fácil compreensão. Segundo Ferreira et al. (2017), esse tipo de abordagem visual contribui para estimular o processo de aprendizagem e favorecer a memorização de conteúdos relacionados à educação ambiental. As ilustrações também desempenham um papel importante ao aproximar o público do tema, despertando curiosidade e incentivando a reflexão sobre a presença dos microplásticos no cotidiano.

Durante a intervenção pedagógica informal, observou-se interesse e envolvimento dos participantes, que demonstraram curiosidade diante das informações apresentadas, especialmente ao compreenderem a relação entre os microplásticos, produtos de uso diário, e seus possíveis efeitos sobre o meio ambiente e a saúde humana. As interações e discussões promovidas ao longo da atividade indicaram uma ampliação da compreensão sobre a temática, reforçando o potencial do panfleto como um recurso eficaz de educação ambiental. O formato visual e a linguagem acessível foram aspectos destacados positivamente, por contribuírem para tornar o conteúdo mais atrativo e compreensível.

Dessa forma, o desenvolvimento e a aplicação do panfleto informativo mostraram-se

etapas fundamentais para o alcance dos objetivos deste trabalho, evidenciando que materiais educativos visuais e bem estruturados são capazes de promover a conscientização ambiental e ampliar o entendimento sobre temas complexos, como a poluição por microplásticos. A experiência proporcionada pela intervenção pedagógica informal reforça a importância da utilização de recursos gráficos e comunicativos em práticas educativas, aproximando o conhecimento científico da sociedade e estimulando a construção de atitudes mais sustentáveis.

5.3 Intervenção pedagógica informal

A atividade educativa foi aplicada em uma escola particular localizada no município de Sorocaba/SP, envolvendo turmas dos 4º e 5º anos do Ensino Fundamental I. A proposta foi desenvolvida de forma coletiva, sem identificação individual dos participantes, priorizando o diálogo e a troca de percepções durante o processo de aprendizagem.

As interações e manifestações dos estudantes ao longo da atividade foram consideradas de maneira geral e analisadas de forma descritiva, possibilitando a observação de diferenças na compreensão do tema antes e após o contato com o material educativo. A comparação qualitativa entre as percepções iniciais e posteriores indicou avanços no entendimento sobre os microplásticos e seus impactos ambientais, evidenciando o potencial da proposta como estratégia de educação ambiental.

Antes da abordagem do tema, os estudantes apresentavam diferentes níveis de familiaridade com o conceito de microplásticos. Parte dos alunos relatou já ter ouvido falar sobre o assunto, enquanto outros demonstraram desconhecimento ou incerteza quanto ao significado do termo. Esse cenário inicial reforçou a necessidade de uma abordagem introdutória, destacando a relevância de ações educativas voltadas ao esclarecimento do tema.

Após a explicação e a leitura do panfleto informativo, observou-se uma ampliação geral da compreensão dos estudantes. Em comparação às percepções iniciais, os alunos passaram a demonstrar maior clareza ao explicar o que são os microplásticos, reconhecendo-os como pequenas partículas de plástico presentes no ambiente e associando-os à poluição ambiental. Enquanto antes eram frequentes manifestações de desconhecimento ou definições imprecisas, após a atividade, as respostas indicaram uma compreensão mais consistente e alinhada aos conceitos apresentados, evidenciando o papel do panfleto como recurso pedagógico no processo de sensibilização ambiental.

As mudanças qualitativas nas percepções dos alunos reforçam o potencial da ação educativa como estratégia eficaz para introduzir e esclarecer temas ambientais

contemporâneos, como a poluição por microplásticos, especialmente no contexto do Ensino Fundamental I.

Inicialmente, os estudantes apresentavam percepções diversas e, em alguns casos, limitadas quanto aos locais onde os microplásticos podem ser encontrados e aos impactos associados à sua presença no meio ambiente. Parte dos alunos os relacionava apenas a ambientes específicos, como áreas de descarte de resíduos ou locais visivelmente poluídos, enquanto outros demonstravam incerteza quanto à abrangência de sua ocorrência. No que se refere aos impactos ambientais e à saúde, havia uma compreensão parcial, com o reconhecimento de possíveis danos ambientais, mas sem associação clara aos organismos vivos e à saúde humana.

Após a explicação e a leitura do material informativo, as discussões em sala revelaram uma melhora no entendimento. Os estudantes passaram a reconhecer que os microplásticos estão presentes em diferentes ambientes aquáticos e podem afetar não apenas os ecossistemas, mas também os animais e os seres humanos. Essa mudança qualitativa indica que o material educativo contribuiu para aprofundar a compreensão sobre os riscos ambientais e à saúde associados a essas partículas.

Também foi possível observar um avanço na acompreensão sobre as causas e origens dos microplásticos no meio ambiente. Antes da atividade, as manifestações indicavam uma associação mais restrita ao descarte inadequado de resíduos visíveis. Posteriormente, os alunos passaram a reconhecer múltiplas fontes geradoras, incluindo processos cotidianos menos perceptíveis, como o desgaste de pneus, a liberação de fibras sintéticas durante a lavagem de roupas e o uso de determinados produtos de higiene pessoal.

Esse avanço demonstra que o panfleto informativo, aliado à explicação didática, contribuiu para esclarecer as diferentes rotas de geração, transporte e dispersão dos microplásticos nos ambientes aquáticos e terrestres. As interações estabelecidas durante a atividade também favoreceram uma maior reflexão sobre o papel das ações humanas na intensificação desse tipo de poluição.

Além disso, observou-se maior sensibilização dos estudantes quanto à responsabilidade individual na redução da poluição por plásticos. Durante as discussões, os alunos destacaram atitudes simples do cotidiano que podem contribuir para a mitigação do problema, como a redução do consumo de plásticos descartáveis, a reutilização de materiais e o descarte adequado dos resíduos.

Ao final da atividade, as percepções expressas indicaram que o contato com o material educativo favoreceu não apenas a aquisição de novos conhecimentos, mas também a ampliação da consciência ambiental relacionada ao uso do plástico no dia a dia. Os alunos demonstraram maior clareza ao relatar aprendizados sobre o conceito de microplásticos, sua presença no ambiente, nos organismos aquáticos e na cadeia alimentar, bem como os

possíveis impactos à saúde humana.

De modo geral, as observações realizadas evidenciam que a proposta atingiu seus objetivos, promovendo aprendizado, sensibilização e engajamento dos estudantes frente à problemática dos microplásticos. A experiência reforça o potencial do uso de materiais educativos visuais, aliados a uma abordagem participativa, como estratégias eficazes para a educação ambiental e para o estímulo à formação de uma consciência crítica e sustentável desde os anos iniciais da escolarização.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A poluição por MP é um problema ambiental relativamente recente e complexo, que envolve muitas questões, como a produção em excesso de plásticos, a maneira como os resíduos são geridos e a eficiência dos sistemas de tratamento de água e esgoto. Os resultados desse estudo mostraram que os MPs já estão presentes em muitos lugares, como rios, lagos, águas subterrâneas e até em água destinada ao consumo. Além disso, sua elevada persistência no meio ambiente e capacidade de agir como vetores de poluentes químicos e patógenos configuram riscos significativos à biodiversidade e à saúde pública.

Do ponto de vista tecnológico, embora as estações de tratamento de esgoto e de água removam uma parte significativa dos MPs, ainda são importantes formas de transporte dessas partículas para os corpos d'água, seja por meio da liberação residual nos efluentes, seja pela reutilização do lodo em áreas de solo. A ausência de padronização nas metodologias de coleta e quantificação de MPs, somada às dificuldades analíticas frente às partículas menores, agrava as incertezas e limita o avanço sobre o ponto de vista de regulamentação. Nesse cenário, torna-se urgente o desenvolvimento de protocolos harmonizados e mais sensíveis de monitoramento ambiental.

A revisão bibliográfica também evidenciou importantes lacunas normativas, especialmente no Brasil, onde ainda não há legislação específica para controle, monitoramento ou definição de limites de microplásticos em água potável. Essa ausência de regulamentação contrasta com iniciativas internacionais, como as diretrizes da União Europeia e legislações de países que já restringem o uso de microesferas plásticas em cosméticos. Assim, a construção de políticas públicas nacionais eficazes deve envolver maior integração entre pesquisa científica, governança ambiental e educação para a sustentabilidade.

As ações educativas desenvolvidas neste trabalho demonstraram que o engajamento da sociedade, especialmente de crianças e adolescentes, é essencial para a transformação do cenário atual. A aplicação do material informativo possibilitou um aumento do conhecimento dos alunos sobre o tema, mostrando que a comunicação científica acessível é uma ferramenta estratégica de mitigação futura. Isso corrobora a literatura que defende

a educação ambiental como base para mudanças comportamentais e redução da geração de resíduos plásticos.

Portanto, conclui-se que o enfrentamento da poluição por microplásticos depende de ações integradas, que envolvam:

⇒ Redução do consumo de plásticos descartáveis e estímulo a alternativas sustentáveis;

⇒ Melhoria da infraestrutura de saneamento e de tecnologias de remoção de MPs;

⇒ Regulamentação específica e monitoramento sistemático nos sistema de abastecimento;

⇒ Desenvolvimento de pesquisas voltadas aos impactos crônicos e à toxicidade humana;

⇒ Fortalecimento de iniciativas de educação ambiental e engajamento comunitário;

Em síntese, os MPs simbolizam o custo invisível do modelo linear de produção e consumo de plásticos. A ciência já aponta seus riscos; agora, a responsabilidade se estende à sociedade, ao poder público e às indústrias para que medidas preventivas e mitigadoras sejam efetivamente implementadas. Somente com ações coordenadas e fundamentadas no conhecimento será possível proteger a saúde humana e garantir a preservação dos recursos hídricos e dos ecossistemas nas próximas décadas.

REFERÊNCIAS

AKYOL, A.; YURDAKUL, S.; KUCUKCONGAR, S. Microplastics in wastewater treatment plants: occurrence, fate and identification. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 146, p. 77–84, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.025.

AMATO-LOURENÇO, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. *Journal of Hazardous Materials*, v. 416, p. 126–160, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126398.

ANCAT – Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis. Economia Circular e Sustentável do Plástico no Brasil é um dos temas da Expocatadores 2022. 2022. Disponível em: https://ancat.org.br/economia-circular-e-sustentavel-do-plastico-no-brasil-e-um-dos-temas-da-expocatadores-2022/. Acesso em: 16 nov. 2025.

AUTA, H. S.; EMENIKE, C. U.; FAUZIAH, S. H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of sources, fate, effects and potential solutions. *Environment International*, v. 102, p. 165–176, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013.

BEHERA, B. K. et al. Microplastics as vectors of heavy metals in wastewater treatment systems. *Water Research*, v. 204, p. 117–122, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117119.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 03 ago. 2023.

BUZO, M. G.; TECCO, V. de. Levantamento de legislações proibitivas para o consumo de plásticos descartáveis nas capitais dos estados brasileiros. *Planeta Amazônia*, n. 12, p. 113–123, 2020.

CALIFÓRNIA. Assembly Bill No. 888, Microbeads-Free Waters Act. 2015. Disponível em: https://leginfo.legislature.ca.gov. Acesso em: 20 out. 2025.

CHANDRA, S.; WALSH, K. B. Microplastics: occurrence, fate, removal and health effects. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 268, p. 104–163, 2024.

CHEN, W. et al. Interaction of microplastics with heavy metals and their combined effects on aquatic organisms: a review. *Science of the Total Environment*, v. 821, p. 153–179, 2022.

DAI, X. et al. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Research*, v. 152, p. 21–37, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.050.

DIKKO, A. et al. Os perigos dos plásticos para a saúde pública: uma revisão. *Revista NIPES de Pesquisa em Ciência e Tecnologia*, v. 2, n. 2, p. 195–200, 2020. DOI: https://doi.org/10.37933/nipes/2.2.2020.20.

ECHA – European Chemicals Agency. Microplastics restriction proposal. 2019. Disponível em: https://echa.europa.eu/hot-topics/microplastics. Acesso em: 22 out. 2025.

ESCROBOT, M. et al. Microplásticos em ambientes costeiros brasileiros: uma revisão sistemática. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 56, n. 1, p. 1–15, 2024. DOI: https://doi.org/10.5327/Z2176-94781719.

FERREIRA, A. C.; LIMA, P. R.; SANTOS, D. S. Materiais educativos impressos como instrumento de sensibilização ambiental. *Revista Educação Ambiental em Ação*, v. 61, p. 1–9, 2017.

FERREIRA, G. et al. Microplastics in aquatic environments: occurrence, effects and treatment. *Marine Pollution Bulletin*, v. 179, p. 113708, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113708.

GITSOV, I. et al. Microplastic conversion and removal strategies in wastewater treatment plants. *Chemical Engineering Journal*, v. 406, p. 126715, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126715.

GONÇALVES, S. et al. Microplásticos no Brasil: fontes, impactos e estratégias de mitigação. *Chemosphere*, v. 321, p. 138158, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138158.

HENRY, T. B. et al. Risks of microplastics: scientific evidence and public perception. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, v. 29, p. 100467, 2021.

HUANG, J. et al. Microplastics and associated contaminants in aquatic environments: ecotoxicological effects. *Journal of Hazardous Materials*, v. 399, p. 122–185, 2020.

IYARE, P.; OUKRICH, M.; JOHNSTON, P. Removal effectiveness of microplastics by wastewater treatment plants. *Environmental Science: Water Research & Technology*, v. 6, p. 2664–2675, 2020.

ISO. Plastics — Environmental aspects — State of knowledge and methodologies. ISO/TR 21960:2020.

KARASIK, R. et al. Annual Trends in Plastics Policy: A Brief. 2023. Disponível em: https://dukespace.lib.duke.edu/items/8ca3e252-9a63-4c4e-ad44-5d023764a6f4. Acesso em: 28 out. 2025.

KHALID, N. et al. Interactions and effects of microplastics with heavy metals in aquatic and terrestrial environments. *Environmental Pollution*, v. 290, p. 118104, 2021.

KYE, H. et al. Microplastics in water systems: environmental impacts and potential risks. *Science of the Total Environment*, v. 795, p. 148831, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.148831.

LI, J. et al. Detection, characterization and removal of microplastics in drinking water: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 2, p. 107319, 2022.

LI, M. et al. Influence of polyethylene microplastics on environmental metal behavior in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 9876–9892, 2021.

MARTINS, G.; RODRIGUES, E.; TAVARES, M. I. B. Revisão da literatura sobre degradação e adsorção em microplásticos. *Conjecturas*, v. 23, n. 2, p. 45–67, 2023.

MASIÁ, P. R. et al. Bioremediation as a promising solution strategy for microplastic removal in wastewater treatment plants. *Marine Pollution Bulletin*, v. 156, p. 111252, 2020.

MASON, S. A. et al. Microplastics in bottled water. *Frontiers in Chemistry*, v. 6, p. 407, 2018.

MENDES, R. A.; SANTOS, G. F.; OLIVEIRA, L. C. Exposição a nano e microplásticos e impactos na saúde humana. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 17, n. 4, p. 112–130, 2022.

MIENSAH, E. D. et al. Microplastics exposure and human health impacts. *Environmental Pollution*, v. 302, p. 119–141, 2022.

MONTAGNER, C. C. et al. Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos. *Química Nova*, v. 44, n. 10, p. 1328–1352, 2021.

NAIR, A. T.; REDDY, S. The fate of microplastics in wastewater treatment plants: an overview. *Environmental Technology & Innovation*, v. 28, p. 102815, 2022.

NGO, P. L.; AZIZ, A.; HASSAN, M. Microplastics in wastewater treatment plants: classification, pathways and removal efficiency. *Environmental Pollution*, v. 255, p. 113326, 2019.

NOVOTNA, K. et al. Microplastics in drinking water treatment: current knowledge and research needs. *Science of the Total Environment*, v. 667, p. 730–740, 2019.

OßMANN, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research*, v. 141, p. 307–316, 2018.

PARLAMENTO EUROPEU. Resolução sobre poluição por microplásticos. TA/2019/0071. 2019.

PIVOKONSKY, M. et al. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of the Total Environment*, v. 643, p. 1644–1651, 2018.

PRATA, J. C. Microplastics in wastewater: sources, fate and solutions. *Marine Pollution Bulletin*, v. 129, n. 1, p. 262–265, 2018.

RAGUSA, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, v. 146, p. 106–160, 2021.

RIO DE JANEIRO. Lei nº 8.090, de 30 ago. 2018. Proibição de microesferas plásticas em cosméticos. Disponível em: https://www.jusbrasil.com.br/legislacao/620825134/. Acesso em: 25 out. 2025.

ROUT, P. R. et al. Degradation and adsorption events in microplastics: a review of their environmental interactions. *Environmental Pollution*, v. 317, p. 120–176, 2022.

SOLES, D. et al. Microplásticos: o perigo oculto. *Jornal de Pediatria*, v. 101, supl. 1, p. S10–S17, 2025.

SOUZA, D. L.; OLIVEIRA, J. M. A importância dos panfletos informativos na promoção da sustentabilidade. *Revista Extensão & Sociedade*, v. 7, n. 1, p. 77–85, 2015.

UNIÃO EUROPEIA. Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption. 2020.

URRUTIA-PEREIRA, M. et al. Human health effects of micro and nanoplastics. *Environmental Pollution*, v. 272, p. 115–291, 2021.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. EPA-SAB-22-007. 2022. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-10/EPA-SAB-22-007.pdf. Acesso em: 22 out. 2025.

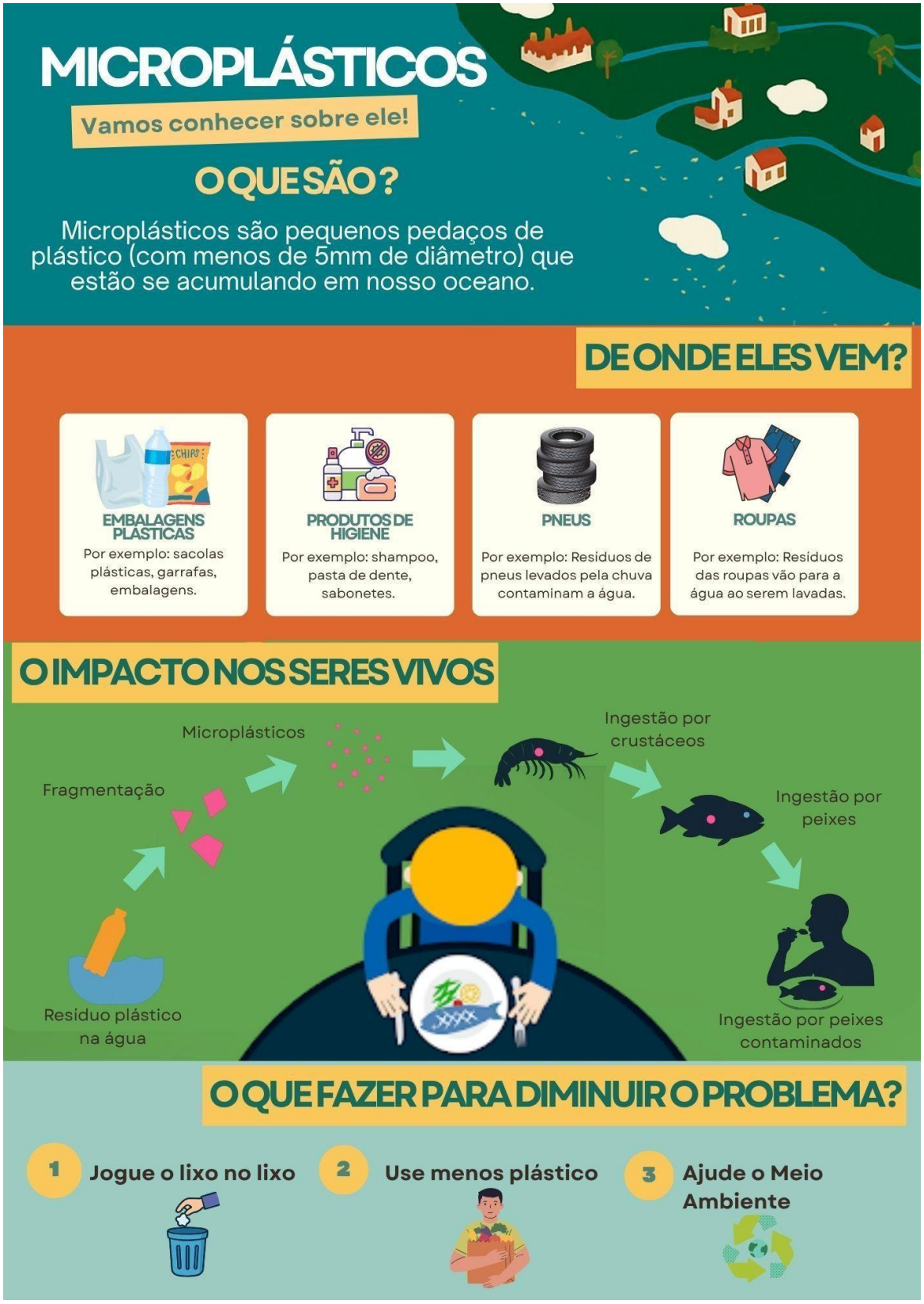
VARGAS, J. et al. Microplásticos: uso na indústria cosmética e impactos no ambiente aquático. *Química Nova*, 2022.

WU, S. et al. Destination and effects of microplastics in wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment*, v. 757, p. 143902, 2021.

WU, W. et al. Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: fate, distribution and removal. *Journal of Cleaner Production*, v. 225, p. 579–586, 2019.

ZHANG, Q. et al. Advances in microplastic removal from water by advanced treatment technologies. *Environmental Research*, v. 212, p. 113574, 2022.

ZHANG, Y. et al. Microplastics and nanoplastics in human blood and tissues: exposure and health implications. *Science of the Total Environment*, v. 873, p. 162–179, 2024.

APÊNDICE

Anexo I - Panfleto Informativo