



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS DE BOTUCATU

Bioacumulação de microplásticos em peixes e potenciais implicações
para o consumo e saúde humana

Bruna Naomi Watanabe

Orientador: Hamilton Hisano

Coorientador: Jheneze Guimarães Pereira Rocha

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Biociências, Câmpus de Botucatu,
UNESP, para obtenção do título de Bacharel em
Ciências Biomédicas.

Botucatu SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

W324b Watanabe, Bruna Naomi
Bioacumulação de microplásticos em peixes e potenciais implicações para o consumo e saúde humana / Bruna Naomi Watanabe. -- Botucatu, 2025
28 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciências Biomédicas) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Botucatu
Orientador: Hamilton Hisano
Coorientadora: Jhenese Guimarães Pereira Rocha

1. Plástico. 2. Poluição marinha. 3. Pescados Contaminação. 4. Fisiologia humana. I. Título.

Bruna Naomi Watanabe

**Bioacumulação de microplásticos em peixes e potenciais
implicações para o consumo e saúde humana**

Subtítulo do Trabalho (se houver)

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado a Universidade Estadual
Paulista, como parte das exigências para
a obtenção do título de Bacharel, do curso
de Graduação em Ciências Biomédicas.

Botucatu , 29 de Julho de 2025.

(data da defesa)

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **HAMILTON HISANO**
Data: 12/08/2025 15:44:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Hamilton Hisano
EMBRAPA Meio Ambiente

Wellerson
Rodrigo
Scarano

Assinado de forma digital
por Wellerson Rodrigo
Scarano
Dados: 2025.08.14
15:24:59 -03'00'

Prof. Wellerson Rodrigo Scarano
UNESP

Prof. (Nome do professor avaliador)
Afiliações

Resumo

A Revolução Industrial, ao impulsionar a produção em larga escala, gerou grandes volumes de resíduos plásticos, cujo degradação lenta dá origem aos microplásticos (MPs), partículas menores que 5 milímetros. Esses MPs, composto em maioria pelos polietilenos, poliestirenos e polipropileno, são reconhecidos como poluentes emergentes globais. Nos ambientes marinhos, além da presença dos microplásticos, também ocorre o processo de bioacumulação em organismos aquáticos de diferentes níveis tróficos, incluindo peixes de interesse comercial, presentes na dieta humana. A ingestão destes alimentos contaminados gera preocupações, a presença de MPs já foi detectada em água potável e em órgãos humanos, e há estudos que implicam estresse oxidativo e genotoxicidade como um dos efeitos em seres vivos. Além das alterações causados pela concentração de micropartículas em células, os MPs também são vetores de outros poluentes químicos, como metais pesados, intensificando os riscos toxicológicos. Considerando as informações anteriores, é de suma importância a investigação da bioacumulação de microplásticos em peixes na cadeia trófica, assim como as implicações à saúde humana. A compreensão mais aprofundada sobre o tema é essencial no planejamento de políticas públicas mais eficazes, garantir segurança alimentar e ressalta a importância da proteção e preservação de ecossistemas globalmente. Portanto, o objetivo deste presente trabalho é levantar estudos a partir da literatura existente sobre contaminação, exposição em peixes e possíveis impactos na saúde humana por transferência trófica. Ainda há a necessidade de estudos mais aprofundados sobre como os MPs podem ser transferidos pela cadeia alimentar e, conseqüentemente, como isso afeta a saúde humana.

Palavras-chave: Microplásticos, bioacumulação, peixes, saúde humana.

Abstract

The Industrial Revolution stimulated large-scale production, which generated substantial quantities of plastics waste. The slow degradation of that material led to the formation of microplastics (MPs), which are particles measuring less than 5 millimeters. These MPs, originated from polyethylenes, polystyrenes and polypropylenes, are considered emergent pollutants. In the marine environment, in addition to the presence of microplastics, there is also the process of bioaccumulation through different trophic levels organisms, including commercial important fishes in the human diet. The contamination of these food sources is of significant concern, as the presence of MPs has already been confirmed in human organs and in drinkable waters. Furthermore, studies have associated the exposure to microplastics with biological effects, such as oxidative stress and genotoxicity. Moreover, MPs are also vectors of other chemical pollutants, such as heavy metals, thereby increasing toxicological hazards. Given the context, investigating the bioaccumulation of MPs via trophic transfer in fishes is of utmost importance, to understand the possible effects on human health. A deeper comprehension of this topic is fundamental to develop more effective public policies, ensuring food security, and highlights the importance of environmental protection and preservation on a global scale. Therefore, the objective of the present study is to provide a compilation of relevant scientific literature sources regarding the contamination and exposure of microplastics in fish, and the possible impacts on human health through trophic transfer. Additionally, further studies depicting how MPs can be transferred through the food chain, and consequently, how it impacts human health are imperative.

Key-words: Microplastic, bioaccumulation, fish, human health

Sumário

Resumo	4
1. Introdução	5
2. Objetivo	7
3. Material e Métodos	7
4. Microplásticos	8
4.1. Definição por padronização de tamanho	8
4.2. Tipos de materiais (polímeros)	9
4.3. Microplásticos como poluentes globais	11
5. Contaminação de peixes por microplásticos	13
6. Possíveis impactos à saúde humana	17
7. Conclusão	21
Referências Bibliográficas	22

1. Introdução

Desde a década de 1950, a produção mundial de plásticos cresceu vertiginosamente, assim como seu descarte inadequado em oceanos, gerando impactos ambientais e socioeconômicos (GESAMP, 2016). No Brasil, em um estudo realizado pelo programa Lixo Fora d'Água em parceria com a Universidade de Leeds, no Reino Unido, estimou que 690 toneladas de plásticos foram despejadas em corpos hídricos todos os anos (ABREMA, 2021). Além disso, análises de resíduos coletados em praias e manguezais revelaram que, dos 15 itens mais frequentes, oito eram plásticos, incluindo fragmentos (rígidos e moles), *pellets*, tampas, recipientes e até microtubos laboratoriais, dos 16.733 itens registrados, 8.139 eram esses materiais (ABREMA, 2021).

Diante desse cenário, a redução, reutilização e reciclagem são medidas cada vez mais necessárias e se alinham aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) com destaque às metas 12.5 (reduzir a geração de resíduos até 2030) e 14.1 (minimizar a poluição marinha até 2025) (ONU, 2015). Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, [s.d]), o índice de reciclagem no país atingiu 56,4% das embalagens PET em 2021, com aumento de 15,4% em relação ao volume registrado em 2019, demonstrando que o Brasil é um dos principais países na reciclagem e aplicação de PET reciclado na indústria (ABIPET, [s.d])

De acordo com a *International Organization for Standardization* (ISO), partículas plásticas são classificadas conforme seu tamanho: aquelas com mais de 5 centímetros são denominadas macroplásticos ou macropartículas; entre 1 e 5 milímetros, são chamadas de microplásticos largos; entre 1 micrômetro e 1 milímetro, microplásticos ou micropartículas; e aquelas com menos de 1 micrômetro são classificadas como nanopartículas (ISO, 2020). Porém, apenas em 2009 esses materiais foram reconhecidos como poluentes emergentes (Thompson *et al.*, 2009). Essas partículas sintéticas são persistentes no ambiente e podem ser ingeridas por organismos marinhos, incluindo peixes, que ocupam diferentes níveis tróficos (Cole *et al.*, 2013).

A bioacumulação de microplásticos (MPs) na cadeia trófica ocorre por meio da ingestão por consumidores primários, como fitoplâncton, zooplâncton, moluscos e algas, que absorvem estas partículas sintéticas por filtração ou adsorção superficial (Thompson *et al.*, 2004). À medida que se avança os níveis tróficos, os MPs são incorporados por processos de ingestão acidental, onde estas partículas sintéticas são erroneamente identificadas como fonte de alimento (Gallo *et al.*, 2018), resultando em biomagnificação, acumulando progressivamente as concentrações de microplásticos nos tecidos de organismos de níveis superiores, como por

exemplo, peixes piscívoros, elevando os riscos de exposição humana via consumo de recursos pesqueiros.

Em função dessa crescente contaminação ambiental, os MPs são considerados poluentes emergentes para a saúde humana com disseminação em escala mundial (Lenz *et al.*, 2015). A acumulação e a distribuição de MPs em organismos aquáticos de interesse comercial são alarmantes, pois podem aumentar o risco de exposição humana e, ao longo prazo, causar efeitos adversos à saúde (Makhdoumi *et al.*, 2023). A principal via de exposição humana ocorre por meio da ingestão, seja por consumo de água contaminada ou pela cadeia alimentar, particularmente por pescados, que é uma importante fonte de proteínas e micronutrientes (Brasil, 2014) e que atuam como meio de transferência trófica desses contaminantes sintéticos (Bora *et al.*, 2024).

Embora os mecanismos de bioacumulação de MPs ainda demandam pesquisas mais aprofundadas, é de conhecimento que suas propriedades físico-químicas favorecem a sorção de poluentes orgânicos persistentes (POPs) e metais pesados (Rochman *et al.*, 2013), com dinâmica ambiental influenciada por características das partículas (Makhdoumi *et al.*, 2023). Essa contaminação representa riscos significativos aos ecossistemas, afetando desde cadeias alimentares marinhas até populações costeiras, com detecção frequente de MPs presentes nos litorais (Avio *et al.*, 2017).

A contaminação por microplásticos em peixes, principalmente os de interesse comercial, tem sido avaliada por representar uma das principais fontes de alimento na dieta humana (Akhbarizadeh *et al.*, 2018). Em estudo com sardinhas (*Dussumieria acuta*) e arenques, Karami *et al.* (2018), detectaram que de 20 marcas analisadas houve presença de MPs em 7 delas, com a contabilização de 21 partículas de MPs no total. Na pesquisa conduzida em Barboza *et al.* (2018) com robalos europeus (*Dicentrarchus labrax*), após contaminá-los com MPs presente na água, foi registrado a diminuição da atividade enzimática muscular e inibição da atividade da acetilcolina no cérebro.

A partir dos estudos em peixes e mamíferos, é possível inferir os possíveis impactos à saúde humana. Na pesquisa de Lu *et al.* (2018) foram utilizados camundongos para determinar a influência dos MPs no sistema digestório e no fígado. O resultado demonstrou que esta exposição acarretou disbiose na microbiota intestinal e disfunções metabólicas hepáticas. Em outro estudo com camundongos, a função da produção de acetilcolina no cérebro alterou-se quando exposta aos MPs, consequentemente gerando neurotoxicidade e alterações comportamentais (Araújo *et al.*, 2021).

Compreender, então, a dinâmica da bioacumulação de MPs em peixes se torna fundamental, não apenas para avaliar a contaminação nos ambientes aquáticos, mas também

para entender melhor as implicações diretas e indiretas para a saúde humana, por meio da cadeia alimentar. O processo de bioacumulação e transferência de microplásticos entre os níveis tróficos exige estudos mais aprofundados. Dessa forma, o levantamento de informações mais relevantes e atualizadas dentro da literatura técnica e científica podem acrescentar dados que contribuam com o desenvolvimento de futuras pesquisas mais aprofundadas a respeito dos possíveis efeitos da exposição aos MPs para a saúde humana.

2. Objetivo

O objetivo desta revisão bibliográfica narrativa foi reunir e compilar informações e resultados técnicos-científicos publicados em periódicos científicos, revistas e documentos técnicos sobre bioacumulação de microplásticos em peixes, principalmente os de interesse comercial, e possíveis relações com o consumo e saúde humana.

3. Material e Métodos

Para a elaboração desta revisão narrativa foram selecionados artigos científicos, artigos de revisão, normas e documentos técnicos. Os mecanismos de busca das publicações foram efetuados nas seguintes plataformas de pesquisa: Google acadêmico, Pubmed, ScienceDirect, Scopus e Scielo, conhecidas pela sua vasta abrangência de dados de base e relevância na literatura científica. A estratégia de busca foi construída a partir do conjunto com os seguintes descritores/palavras-chave: “microplastics”, “commercial fishes”, “human consumption”, “human health”, “trophic” e “bioaccumulation”, buscando nos títulos, resumos ou nas palavras-chave. Não foi aplicada nenhuma restrição por ano de publicação, visando abranger toda a literatura relevante possível.

Adicionalmente, a escolha de referências foi realizada em duas etapas: inicialmente começou por um processo de seleção com base na leitura do título e resumo, foi atentado escolher as literaturas que focam nos conceitos de contaminação por microplástico ambientais, via de exposição, achados toxicológicos e em experimentos que utilizem peixes de importância comercial e alimentícios, além disso, a seleção abrangeu estudos que fazem associação aos potenciais impactos à saúde humana.

Por fim, a síntese dos dados coletados dos artigos previamente analisados foi feita através de agrupamentos de temas de importância crescente, com o objetivo de discutir a exposição por bioacumulação (direta ou indireta) e os impactos físico-químicos e fisiológicos em seres vivos.

4. Microplásticos

4.1. Definição e padronização por tamanho

Existem divergências entre os autores quanto à definição de microplástico. No entanto, o conceito mais amplamente aceito é o proposto em Arthur *et al.* (2009) em “*Proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects, and fate of microplastic marine debris*” do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Os autores consideram microplástico como partículas com tamanho inferior ou igual a 5 milímetros (mm) ou até 333 micrômetros (μm), medida esta que corresponde ao diâmetro das malhas de rede de nêuston tradicionalmente empregadas na coleta de plânctons e detritos flutuantes (Arthur *et al.*, 2009).

Pelos parâmetros do *Joint Group of Experts on Scientific Aspects of Marine Environmental Protection*, (Gesamp, 2016), os plásticos podem ser categorizados em quatro tipos. As partículas menores que 5 milímetros (mm) são classificadas como microplásticos. Se o tamanho for menor do que 2,5 centímetros (cm) é mesoplástico, se medir menos de 1 metro (m) é categorizada como microplásticos e, por fim, se for maior do que 1 metro é denominado de megaplástico (GESAMP, 2016).

No relatório de *Science Advice for Policy by European Academies* (SAPEA, 2019), a definição de microplástico refere-se a partículas de 5 até 0,1 milímetros (mm), já os nanoplásticos são partículas de dimensões inferiores a 0,1 milímetros (SAPEA, 2019).

Em 2020, a *International Organization for Standardization* (ISO), por meio do relatório técnico ISO/TR 21960, estabeleceu categorias de dimensões para cada tipo de partícula. Qualquer partícula sólida e insolúvel à água com dimensão acima de 5 milímetros (mm) é macropástico ou macropartícula. Se sua dimensão for de 1 micrômetro (μm) a 1000 micrômetro (μm) ou 1 milímetro (mm) é microplástico ou micropartícula. Partículas de 1 a 5 milímetros (mm) são categorizadas como microplástico largo, e plásticos com dimensões menores de 1 micrômetro (μm) são nanopartículas (ISO, 2020).

4.2 Tipos de materiais (polímeros)

Além da classificação dos microplásticos por tamanho, o material também pode ser utilizado como outro método de definição. A origem do plástico pode ser de dois tipos: natural, por exemplo, a celulose ou a borracha natural, ou sintética. Dentro da categoria de polímeros sintéticos, destacam-se os polipropilenos (PP), poliestirenos (PS), tereftalatos de polietilenos (PET), polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE em inglês) e de baixa densidade (PEBD ou LDPE em inglês), nylon, policloreto de vinil (PVC), poliamida (PA) e poliuretano (PU)

(GESAMP, 2016). Na tabela 1, é apresentado os principais plásticos recicláveis e simbologia utilizada para identificação do material.

Tabela 1: Nomenclaturas, número de identificação de resina e nomes completos dos polímeros.

Nomenclatura na reciclagem em português	Nomenclatura em inglês	Número de identificação de resina e simbologia	Nome do polímero completo
PET	PET		Poli (tereftalato de etileno)
PEAD	HDPE		Polietileno de alta densidade
PVC	PVC		Policloreto de vinila
PEBD	LDPE		Polietileno de baixa densidade
PEBDL	LLPE		Polietileno de baixa densidade linear
PP	PP		Polipropileno
PS	PS		Poliestireno
Outros	<i>Others</i>		Vários: Poliamida, Poliéster, Teflón, Poliuretano

Fonte: Adaptado de <https://www.sindiplast.org.br/tipos-de-plasticos/>, [s.d]

Dentro da categoria de plásticos sintéticos, há uma classificação adicional com base em suas propriedades termomecânicas: polímeros termoplásticos e termorrígidos (Andrady, 2017). Os termoplásticos são materiais que podem ser fundidos e remodelados, ou seja, é possível reciclá-los. Os exemplos de polímeros termoplásticos são: fragmentos plásticos, microesferas empregadas em cosméticos, fibras e espuma de poliestireno expandido. Em contraste, os termorrígidos possuem estrutura reticulada, logo, não podem ser derretidos e remodelados, se encaixam nesta categoria borracha de pneus de veículos, espuma isolante térmica, revestimentos de proteção e cascos de navios (Andrady, 2017).

O método para detecção de microplásticos empregados nos estudos variam conforme o seu objetivo e aplicação prática na pesquisa. Entre as técnicas mais utilizadas, destacam-se a espectrometria de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia Raman e o microscopia estereoscópica.

A técnica de espectrometria de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) possibilita a identificação de polímeros em partículas com dimensões a partir de 10 micrômetros (μm). Este processo baseia-se na emissão de radiação infravermelha na partícula para determinar o tipo de polímero. Entretanto, é cogitada a possibilidade de alterações na transmissão do feixe de infravermelho ao passar pelo cristal de atenuação de reflexo total (ATR). Em um estudo comparativo realizado em Song *et al.* (2015), o FTIR demonstrou um desempenho melhor e mais preciso em análises de amostras menores que 1 milímetro (mm) em comparação com a microscopia estereoscópica, embora o tempo de processamento seja maior.

A espectroscopia Raman funciona de forma semelhante com a FTIR, porém ela se distingue quanto capacidade de captação de informações vibracionais das estruturas moleculares, identificando partículas menores do que 1 micrômetro (μm) e possibilita a utilização de todo o alcance do espectro para identificação. Além disso, esta técnica não depende da transmissão de luz através do material, o que a torna adequada para identificar partículas mais opacas ou que possuem maior absorção de luz (Lenz *et al.*, 2015). O ideal é a utilização das duas técnicas em conjunto para se obter maior precisão de dados (Song *et al.*, 2015).

A microscopia estereoscópica é uma técnica que depende da inspeção visual das partículas e de identificação pelas características físicas, como opacidade, cor, forma e tamanho (Song *et al.*, 2015). Ao comparar a quantidade de partículas detectadas pelo FTIR e pelo microscópio, o FTIR obteve um desempenho melhor, identificando uma maior variedade e tamanhos menores de partículas. No entanto, se o foco for na análise de partículas maiores que 1 milímetro (mm), a microscopia seria a técnica mais adequada, tendo a visualização direta da partícula (Song *et al.*, 2015).

Um dos principais obstáculos na preparação das amostras são os materiais orgânicos que são extraídos junto com o microplástico, porque é preciso considerar a possibilidade de alteração na partícula ao expô-la a meios ácidos ou básicos. Ademais, uma amostra limpa de matéria orgânica facilita a leitura seja nas técnicas espectrométricas ou por microscopia.

Ademais, não só os materiais dos polímeros que afetam o ambiente, os aditivos utilizados nos plásticos para aumentar mais ainda a maleabilidade, durabilidade ou resistência também se mostraram prejudiciais e potenciais desreguladores endócrinos (EDPs) em humanos. Entre eles estão o bisfenol-A (BPA), utilizados na fabricação de resina epóxi, os ftalatos ésteres, que aumentam a durabilidade e resistência, ftalato de butila (agente anti-rachadura em verniz de unha) e de etila (amaciador de pele e fixador de fragrância e cor), e éteres difenílicos polibromados, as suas formas penta, octa e deca possuem propriedades anti-chamas, e a forma nonilfenol atua como estabilizador dos polipropilenos e dos poliestirenos (GESAMP, 2016).

4.3 Microplásticos como poluentes globais

Devido às propriedades intrínsecas do plástico, como custo baixo e maleabilidade, a indústria desenvolveu uma gama de aplicação para este material (Thompson *et al.*, 2009). No entanto, devido ao descarte incorreto ou irregular de resíduos plásticos, a poluição não apenas causa impacto visual, mas também gera impactos econômicos. O acúmulo de detrito ao longo das costas marinhas, pontos turísticos importantes para as cidades costeiras e para o país, deprecia o valor comercial e visual destes locais (Avio *et al.*, 2017).

Além da poluição decorrente do descarte irregular e incorreto dos plásticos, os microplásticos podem atingir os ambientes marinhos pelo escoamento de águas pluviais e efluentes de esgoto (Pegado *et al.*, 2018). Embora normalmente o sistema de tratamento de água e de esgoto consigam reter resíduos sólidos de dimensões maiores, em temporadas de chuvas intensas, estas estações podem ficar sobrecarregadas, permitindo a ultrapassagem das partículas do sistema de tratamento. As partículas maiores que chegam aos oceanos degradam-se em fragmentos menores, contribuindo para a problemática dos macroplásticos e de microplásticos nos ambientes marinhos (Andrady, 2017).

Embalagens e outros tipos de produtos derivados de polímeros, ao fim de sua vida útil, são descartados de forma inadequada e acabam se acumulando no ambiente. Apesar da lacuna de conhecimento da quantidade exata de resíduos plásticos terrestres que alcançam os oceanos (Ivar do Sul *et al.*, 2009), a presença dos plásticos foi registrada em outras ambientes, como geleiras (Avio *et al.*, 2017) e em corpos hídricos de água doce, como rios e lagos (Koelmans *et al.*, 2017).

O plástico origina-se de polímeros modificados e devido a essas diferenças estruturais, cada tipo de microplásticos possui diferentes densidades e propriedades físico-químicas (Gallo *et al.*, 2018). Consequentemente, estas diferenças resultam em interações diversas com substâncias químicas e metais pesados presentes no ambiente. A capacidade de adsorção e liberação de contaminantes dos MPs, além de sua ingestão por organismos, torna-os potenciais vetores de poluentes tóxicos ao longo da cadeia alimentar (Koelmans *et al.*, 2017). Estas interações podem causar diversos tipos de impactos no organismo, e consequentemente, e sendo prejudiciais à saúde humana e animal (Gallo *et al.*, 2018).

Adicionalmente, o comportamento das partículas no ambiente depende de seu grau de exposição, por exemplo, a formação de colônias de organismos na superfície da partícula (*biofouling*) pode aumentar a sua densidade, levando a diferentes interações verticais ao longo da coluna aquática (Avio *et al.*, 2017)

Em termos morfológicos, as partículas se apresentam de várias formas, como fragmentos, fibras e grânulos. O tipo predominante de microplásticos nos oceanos são os secundários, resultado da degradação de plásticos maiores (Andrady, 2017).

Para avaliar a sorção de aditivos plásticos em MPs, Rochman *et al.* (2013), conduziram um experimento laboratorial para avaliar as interações dos polímeros mais comuns (LDPE, HDPE, PP, PET e PVC) com o policloreto de bifenila (PDA) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), ambos contaminantes marinhos. O estudo utilizou *pellets* dos 5 tipos de polímeros que foram distribuídos em 5 docas em locais diferentes. As coletas foram feitas trimestralmente em um período de 12 meses. Os resultados indicaram que os HDPEs e LDPEs apresentaram maior sorção de PAHs e PCBs, seguido pelo PP (sorção intermediária) e o PET e PVC demonstraram menor capacidade de sorção, atingindo o platô na taxa de sorção de contaminantes em 6 meses, enquanto o HDPE e LDPE não o alcançaram em 12 meses. Esta diferença foi atribuída a sua estrutura mais “borrachuda”, maior área de superfície e uma maior distância entre uma cadeia polimérica do HDPE e LDPE. Conclui-se então que o PET e o PVC são potencialmente menos perigosos para os animais marinhos em casos de consumo acidental, devido a menor sorção de substâncias orgânicas (Rochman *et al.*, 2013).

Do ponto de vista toxicológico, as principais vias de absorção podem ser divididas em três: via oral/digestiva, respiratória e dérmica, com a via digestiva sendo mais significativa. Estima-se que, em média, o ser humano consome em média 50.000 partículas de microplástico por ano (Bora *et al.*, 2024). A exposição a MPs pela via respiratória é mais expressiva em ambientes densamente poluídos e populosos, nos quais predominam os microplásticos secundários (Wright *et al.*, 2020). Pela via dérmica, apesar deles não permearem a barreira epitelial, o uso de certos tipos de cremes e esfoliantes para a pele se acumulam microplásticos e após enxágue, esses depósitos escoam para o esgoto e, por fim, deságuam para corpos hídricos (Fendall; Sewell, 2009).

Prosseguindo com a problemática dos MPs, além das consequências geradas pelos polímeros e seus aditivos, também existe a possibilidade de bioacumulação de substâncias como poluentes orgânicos persistentes (POPs) (Arthur *et al.*, 2009) e de metais pesados (Gallo *et al.*, 2018) em suas partículas. Não é possível determinar a origem das micropartículas devido a sua ampla dispersão pelo ambiente (Ivar do Sul *et al.*, 2009).

5. Contaminação de peixes por microplásticos

A literatura científica atual oferece um embasamento mais concreto acerca da presença de microplásticos no bioma marinho. Um dos primeiros artigos publicados sobre essa poluição

foi o de Carpenter *et al.* (1972), que documentou a presença de esférulas de poliestireno na costa no noroeste da Nova Inglaterra. Desde então, a presença de microplásticos em diferentes localizações têm sido documentadas.

É importante investigar possíveis contaminações por MPs por meio da transferência trófica, uma vez que a questão deixaria de ser apenas econômica e passaria a ser de âmbito da saúde também. No estudo de Cole *et al.* (2013), relatou a contaminação por microplásticos em zooplânctons, organismos que compõem a base da cadeia alimentar. Além disso, na pesquisa feita por Pegado *et al.* (2018) na costa norte do Brasil entre o Amapá e Pará, foram encontrados no total 228 partículas de MPs no intestino de 26 espécimes de 14 espécies diferentes, demonstrando a extensão da poluição por microplásticos no Brasil, o mais contaminado foi o xaréu (*Caranx hippos*), com 50 partículas registradas por espécime, e várias outras espécies de importância pesqueira, porém não foi possível correlacionar a ingestão de MPs com o nível trófico.

Em Dantas *et al.* (2020), antes de realizar o experimento foi teorizado que a bioacumulação de MPs por transferência trófica acontecia. Após análises de 214 conteúdos gástricos de 7 espécies de peixes coletados de praias brasileiras, 55% dos indivíduos estavam contaminados, contabilizando 327 partículas identificadas e classificadas em 7 categorias diferentes. No entanto, não foi possível correlacionar, a partir destes resultados, que os hábitos alimentares de diferentes espécies diferem na ocorrência de transferência trófica, entretanto, o resultado das análises sugere que a contaminação por ingestão acidental de microplásticos presentes nas colunas d'água e nos sedimentos seja mais relevante.

Por outro lado, um estudo feito por Justino *et al.* (2023), realizado no sudoeste do mar Atlântico tropical, abrangendo a zona econômica exclusiva (ZEE) do Brasil e Fernando de Noronha, investigou a presença de plásticos em atuns (*Thunnus albacares* e *Thunnus obesus*) e espécies pelágicas grandes como barracudas (*Sphyraena barracuda*) e cavalas-wahoo (*Acanthocybium solandri*), todos os peixes mencionados anteriormente possuem valor comercial e alimentício. Para se realizar as análises de microplásticos, foram separados especificamente estômagos de 9 atuns-amarelo, detectando 93 partículas, o que dá em média 10,33 partículas por indivíduo, a limitação deve-se ao processo mais complexo de preparo.

No mesmo estudo, fortaleceu-se a hipótese sobre bioacumulação de MPs por transferência trófica. Foram separadas 34 amostras de presas com órgãos intactos, dentro dos estômagos de peixes pelágicos, e detectou-se visualmente 355 partículas microplásticas, os mais contaminados foram os cefalópodes com 27,33 a 30,98 partículas por indivíduo, seguido dos peixes da família *Bramidae* com 19,45 a 31,15 partículas por indivíduo em média. Foi possível notar que na ZEE brasileira havia maior contaminação de microplásticos do que em

Fernando de Noronha, este padrão foi explicado pelos hábitos alimentares das presas de buscar alimento em camadas mais profundas (Justino *et al.*, 2023).

A ubiquidade do MP estende-se também a diferentes sistemas biológicos, com a contaminação de peixes sendo amplamente documentada, não seria diferente em outros locais no mundo. Em um estudo conduzido pelo Akhbarizadeh *et al.* (2018), 71 peixes pertencentes de 4 espécies de interesse comercial comprados em mercados locais da Ilha Kharg, Golfo Pérsico, foram eviscerados e o tecido muscular foi separado para análise.

Das espécies marinhas selecionadas, o *Epinephelus coioides*, ou garoupa-malabar, continha 7.75 a 2.16 itens por 10 gramas de tecido muscular. No peixe que obteve a menor concentração de microplástico, o *Sphyrna jello*, ou barracuda-do-mar-vermelho, com 1.69 a 5.66 itens por 10 gramas de músculo, o consumo desse peixe resultaria 169 itens e 28 itens em adultos e em crianças, respectivamente, com maior concentração em espécies bentônicas, esse achado sugere que a densidade do microplástico era maior do que o da água do mar, logo, estas partículas afundaram e se sedimentam no fundo marinho. Estes peixes possuem importância comercial no Golfo Pérsico, movimentando a economia local e do país.

Barboza *et al.* (2018), conduziram um experimento com robalos europeus (*Dicentrarchus labrax*) com objetivo de investigar as interações tóxicas entre MPs e mercúrio, bem como os seus efeitos e bioacumulação por transferência trófica. Foram preparados 9 tipos de tratamentos em tanques, grupo controle sem contaminantes, grupos expostos apenas a microplásticos (baixa: 0.25 mg/L; alta: 0.69 mg/L) ou mercúrio (baixa: 0.009 mg/L; alta: 0.016 mg/L), e outros 4 grupos com diferentes combinações de concentração de ambos os elementos, simulando diferentes dose-resposta e interações. As análises iniciais demonstraram alterações na atividade comparada ao grupo controle.

Esta pesquisa revelou que a presença dos MPs influencia a concentração de mercúrio em cérebros e tecidos musculares em peixes. Em altas concentrações, os microplásticos, apenas, inibiram a atividade da acetilcolina e o aumentaram a atividade da oxidação lipídica, inferindo uma possível neurotoxicidade, danos lipídicos e estresse oxidativo nos animais. Mais significativamente, os mesmos efeitos tóxicos ocorreram com o mercúrio independente da concentração de microplásticos, sugerindo que, apesar dos impactos não se somarem, a combinação entre os dois se influenciam toxicologicamente, sugerindo sinergia (Barboza *et al.*, 2018).

A tilápia (*Oreochromis niloticus*) é um pescado amplamente comercializado e consumido no Brasil. No entanto, apesar de ser uma das espécies aquáticas mais cultivadas, a importação de produtos alternativos de origem animal representa uma concorrência direta para os produtores nacionais (EMBRAPA, 2023). Diante da importância comercial desse peixe e da

crescente poluição de microplásticos em ambientes aquáticos, a investigação dos potenciais efeitos desta espécie se tornam relevantes.

Neste contexto, o estudo realizado por Ding *et al.* (2018) com a tilápia vermelha *Oreochromis niloticus*, demonstrou, após 14 dias de exposição a MPs pela água, a detecção dessas partículas no cérebro, fígado, guelras e estômago. A análise de atividade colinesterase no cérebro revelou a inibição da capacidade catalítica da enzima no órgão contaminado pelo microplástico. Observou-se também o aumento da atividade da superóxido dismutase, uma enzima crucial na defesa contra espécies reativas de oxigênio (ERO), sugerindo a formação de EROs em resposta à exposição aos microplásticos.

A interconexão entre o bioma marinho e terrestre, revela a existência de transferência trófica, bioacumulação e biomagnificação de contaminantes, que progridem de um ser vivo para outro. Mesmo que o número de partículas possa diminuir dependendo do nível trófico, é fundamental considerar que estes mesmos contaminantes, microplásticos com substâncias tóxicas adsorvidas, são transferidos de espécies aquáticas para mamíferos, incluindo os seres humanos, que ocupam o topo da cadeia alimentar. A dinâmica descrita torna-se crucial na avaliação de potenciais impactos destes poluentes no consumo e na saúde humana.

O estudo feito por Karami *et al.* (2018), simulou a contaminação e processamento das sardinhas (*Dussumieria acuta*) e arenques enlatados para avaliar a trajetória de MPs no processo de fabricação. Sardinhas-arco-íris com diferentes tipos de microplásticos (HDPE, LDPE, PP, PS, PET, PVC e NY6/NY66) implantados em suas cavidades abdominais foram cozidas a 125°C por 30 minutos, empregando o método tradicional de enlatamento. Após o cozimento, houve uma grande taxa de recuperação dos polímeros sem grandes alterações morfológicas previamente analisadas, com exceção ao LDPE que derreteu. As partículas detectadas incluem 6 polímeros, 9 aditivos, 1 carbono amorfo e outras 5 não-identificadas.

A pesquisa também analisou 20 marcas de peixes enlatados e foi detectado MPs em 7 deles, sendo o PP, PET, PVC e PE, além dos aditivos como óxido de titânio e ftalocianina. Embora o estudo não tenha feito uma correlação sobre os possíveis efeitos na saúde humana e a bioacumulação desses contaminantes, foi enfatizado a urgência de vigilância sobre a contaminação de microplásticos em produtos alimentícios como questões de segurança alimentar e saúde pública.

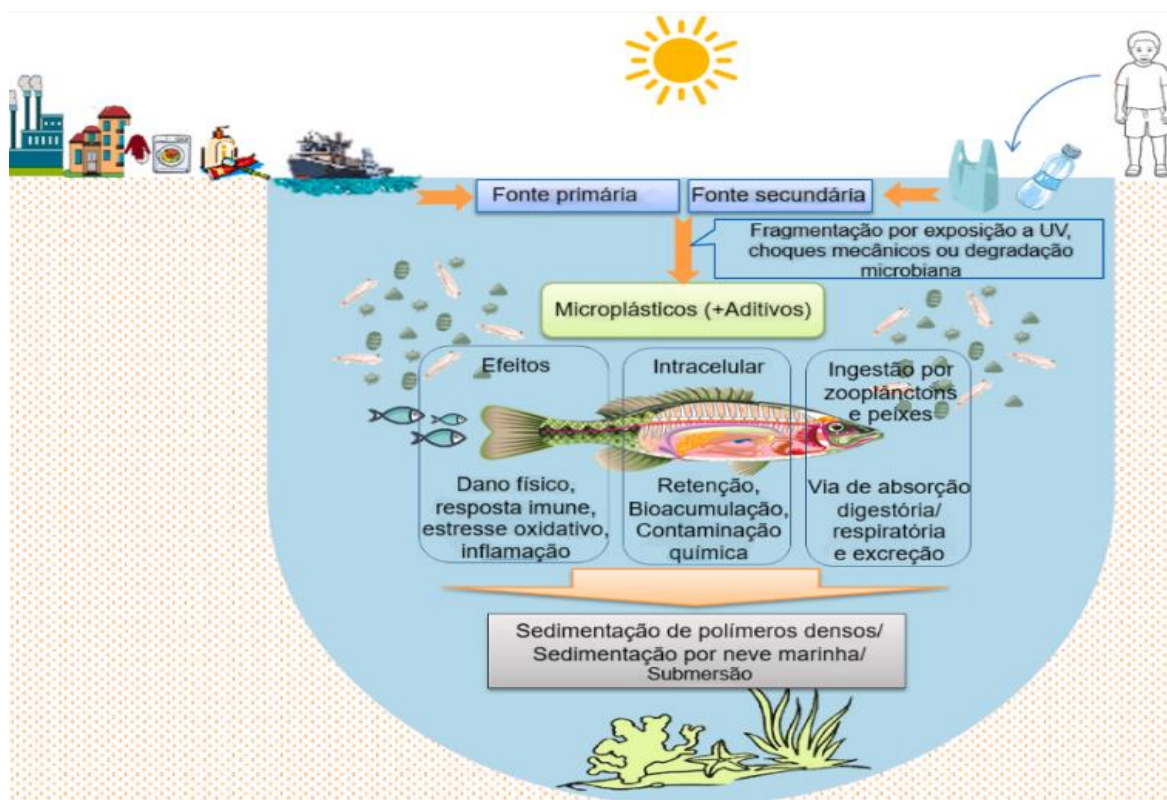
A bioacumulação, fenômeno já observado em POPs e metais pesados, é descrito como o aumento da concentração de substâncias em um organismo ao longo do tempo (Teuten *et al.*, 2009). É fundamental também considerar este fenômeno em um peixe e sua bioconcentração, ou seja, quanto uma dieta contendo microplásticos, tanto pela bioacumulação (absorção de todas as fontes ao longo do tempo), quanto a bioconcentração (concentração de micropoluentes

é superior da detectada no ambiente). A quantidade de MPs acumulada e seus efeitos fisiológicos podem variar, uma vez que a transferência trófica, de um organismo inferior para outro de nível superior, podem ter diferentes cargas de contaminantes.

A bioacumulação por transferência trófica pode ocorrer das seguintes formas: a bioacumulação direta, quando um organismo, como um peixe, ingere diretamente o plástico, e a bioacumulação indireta, que pode acontecer se existir alguma substância adsorvida no plástico ou quando o predador captura um outro animal que tenha previamente se alimentado de plástico ou microplástico (GESAMP, 2016).

A partir de dados compilados de diversos artigos, é possível traçar as possíveis rotas de exposição aos microplásticos, biodisponibilidade e toxicidade em ambiente marinho (Figura 2). A contaminação de MPs nos oceanos, advindas tanto de fontes primárias quanto de secundárias, ao serem submetidos aos fenômenos de degradação físico-químicos, geram partículas de MPs cada vez menores, afetando diferentes níveis na coluna d'água, podendo acarretar a sedimentação ou submersão destes micropoluentes. Ao serem incorporados pelas vias respiratórias ou na ingestão acidental de MPs nos peixes, os efeitos no organismo podem variar, desde inflamações e estresse oxidativo, até mesmo, a níveis intracelulares, a retenção, bioacumulação e contaminação química. Em síntese, a ilustração resume toda a dinâmica dos microplásticos como poluentes marinhos e como o peixe é afetado.

Figura 2. Modelo conceitual de potenciais rotas de transporte de microplásticos para o ambiente marinho, biodisponibilidade e toxicidade.



Fonte: Adaptado de Makhdoumi *et al.* (2023).

6. Possíveis impactos à saúde humana

Após demonstrar a ubiquidade dos microplásticos em diversos modelos de espécies aquáticas, enfatizando as de relevância comercial e nutricional, e ampla contaminação desses poluentes nos ambientes marinhos e de água-doce, torna-se imperativo discutir as implicações na saúde humana. Dado o consumo de pescados, seja pelos seus benefícios ou questões culturais, elevam-se as preocupações quanto à contaminação destes alimentos para a saúde humana. Embora não existam pesquisas consolidadas dos efeitos toxicológicos em organismos humanos *in vivo*, é possível inferir os potenciais impactos em modelos animais, que têm sido amplamente utilizados para este fim.

Diante da crescente presença de microplásticos em variados tipos de alimentos, incluindo peixes, torna-se relevante quantificar a extensão da contaminação em seres humanos. Neste contexto, o cálculo desenvolvido em Makhdoumi *et al.* (2023) serve para estimar a quantidade de microplásticos consumidos na dieta humana baseando-se em dados compilados da literatura existente. Segue o modelo de equação proposto:

$$EDI = IR \times C$$

$$EAI = EDI \times 365$$

Onde o EDI representa a ingestão diária estimada, calculada a partir do índice de consumo de músculo de peixe global (IR). Para adultos e crianças, o valor recomendado pelo

artigo é 21 e 10 quilos de peixes no ano, respectivamente. O C corresponde à concentração de microplástico encontrada no alimento. O índice anual de ingestão (EAI) é calculado a partir da média de concentração de MPs reportada na pesquisa é expresso em P/kg/bw/year (partículas por quilo de peso corporal por ano). Contudo, é importante ressaltar que o EAI constitui apenas como uma estimativa e não representa o risco real de exposição humana aos microplásticos.

A presença destes micropoluentes em organismos marinhos, como peixes, levanta questões como mais uma das formas de contaminação pela dieta humana, e implicações na saúde ainda estão sendo investigadas.

Neste contexto, em 2021, as primeiras evidências de presença de microplásticos em placentas humanas foram registradas em Ragusa *et al.* (2021). No estudo em questão, das 6 placentas analisadas, 4 apresentaram MPs, no total foram encontrados 12 tipos de partículas de diferentes formatos. A distribuição destes microplásticos inclui 5 tipos pelo lado fetal, 4 no lado materno e 3 na membrana cório-amniótico. Esses achados não só confirmam o registro de micropoluentes dentro do organismo humano, mas também sugere que estas partículas são capazes de ser transportadas via corrente sanguínea materna para o feto (Ragusa *et al.*, 2021), levantando preocupações sobre potenciais impactos na saúde pré-natal devida a esta exposição.

Embora pesquisas sobre os possíveis impactos dos microplásticos na saúde humana sejam insuficientes e inconclusivas, na literatura existem registros de interações entre os MPs com diferentes sistemas biológicos no organismo humano. Sabe-se que dependendo da área de superfície da partícula e porosidade é possível que haja a sorção de substâncias químicas (Rochman *et al.*, 2013) e metais pesados (Akhbarizadeh *et al.*, 2018) ao polímero devido a sua propriedade hidrofóbica. Consequentemente, levando à bioacumulação de substâncias que comprovadamente possuem efeitos nocivos ao organismo como disruptores endócrinos (Gallo *et al.*, 2018), neurotoxicidade e danos lipídicos (Barboza *et al.*, 2018).

Fatores como tamanho da partícula e exposição a contaminantes são determinantes no risco à saúde humana (Wright; Kelly, 2017). Sendo o plástico um material inerte, ou seja, seu processo de degradação é muito lento, esta biopersistência pode induzir reações inflamatórias, estresse oxidativo, apoptose e necrose (Wright; Kelly, 2017). Independente da via de entrada no organismo, os microplásticos poderão causar tanto danos físicos quanto químicos.

Com relação à exposição por vias aéreas, um estudo feito por Wright *et al.* (2020) indicou que os microplásticos predominantemente encontrados na atmosfera são de formato fibroso. Embora haja apenas especulações quanto a origem deste material, infere-se que há relação com a lavagem de material têxtil ou de carpetes e vestuários, no entanto, a origem destas partículas permanece indeterminada. No entanto, apesar da hipótese de que possa acontecer a entrada de microplásticos para o sistema gastrointestinal através da deglutição do muco presente

nas vias aéreas superiores, ainda não é possível determinar as consequências da deposição do microplástico em ambos os sistemas.

A ingestão, seja de forma direta, quando a partícula está no alimento, ou indireta, quando o animal consumido está contaminado, constituem as principais vias de exposição humana por MPs (Bora *et al.*, 2024). Em estudos com simulações das condições fisiológicas da digestão humana demonstraram liberação de substâncias químicas que estavam anteriormente incorporados ao microplástico, estas partículas então podem se decompor e liberar monômeros ou aditivos resultantes de seu processo de fabricação (Teuten *et al.*, 2009). Além disso, podem também ocorrer a liberação de substâncias adsorvidas ao polímero durante a sua exposição a poluentes orgânicos persistentes ou de disruptores endócrinos em ambientes contaminados (Gallo *et al.*, 2018). Consequentemente, essa liberação de diversas substâncias tóxicas resulta na possibilidade de indução de efeitos prejudiciais como genotoxicidade, carcinogênese, dano tecidual e celular localizado, apoptose celular, estresse oxidativo, fibrose e necrose tecidual e inflamação (Makhdoumi *et al.*, 2023).

Além dos prejuízos mencionados anteriormente, a presença de MP no sistema gastrointestinal também causa diversos impactos. No estudo realizado por Deng *et al.* (2020) os camundongos que foram expostos a microplásticos virgens e a partículas contaminadas com ésteres de ftalatos demonstraram maior permeabilidade e inflamação intestinal, conhecida como “intestino permeável” na saúde humana, aumentando a passagem de toxinas e patógenos para a corrente sanguínea. Além disso, a exposição às partículas acarretou perturbações metabólicas e lipídicas, e alterações na expressão gênicas na microbiota intestinal, ou seja, levou a uma disbiose, fenômeno relacionado a estresse oxidativo e alterações na resposta imunológica.

Em uma pesquisa preliminar realizada por Araújo *et al.* (2021) o foco concentrou-se no impacto dos microplásticos por via de transferência trófica e nos efeitos comportamentais. A ingestão de peixes da espécie tambatinga (cruzamento entre uma fêmea *Colossoma macropomum* e um macho *Piaractus brachypomus*) e girinos (*Physalaemus cuvieri*), contaminados por MPs, consumida pelos camundongos, resultou na transferência trófica de partículas e, consequentemente, no desenvolvimento de distúrbios comportamentais como aumento da ansiedade, menor atividade locomotora e resposta de mecanismo de defesa reduzida. Estes achados são um alerta quanto à problemática da bioacumulação direta e indireta em humanos, levantando a possibilidade da exposição a microplásticos possa também acarretar distúrbios neurológicos, cognitivos e de comportamento.

Enfatizando os potenciais efeitos sistemáticos do microplástico, na comunidade científica tem se solidificado a relação entre os sistemas digestório e nervoso, conhecida como

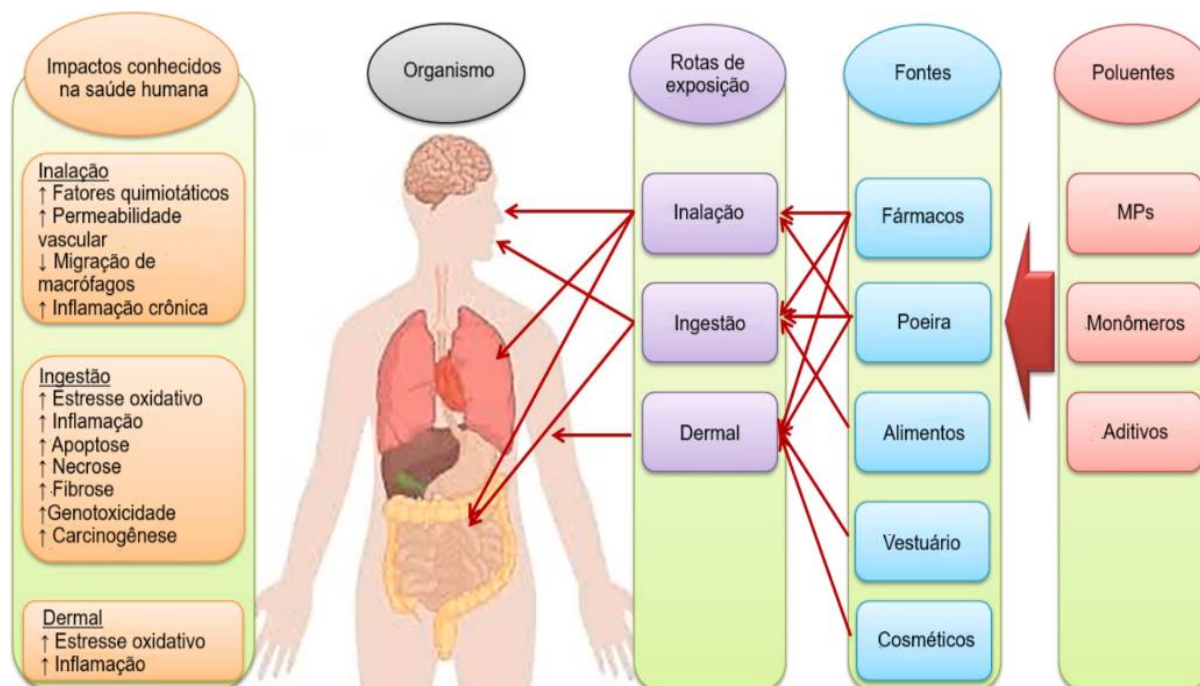
eixo intestino-cérebro. A homeostase da microbiota intestinal depende de múltiplos fatores, incluindo dieta, atividade física, uso de medicamentos e genética (Foster; Neufeld, 2013).

Em Lu *et al.* (2018) foi realizado um experimento dos efeitos da exposição a microplásticos em ratos, especificamente no fígado e no intestino. Os principais achados revelaram que houve diminuição da transcrição de genes relacionados à produção de mucina no cólon, levando à diminuição da secreção de muco, elemento crucial na defesa do tecido mucoso do intestino contra a invasão de patógenos no lúmen. Adicionalmente, foi identificado distúrbios metabólicos no fígado, que os autores associaram à disbiose na microbiota intestinal. Tais resultados, em modelo animal, fornece indícios de possíveis mecanismos de impactos na homeostase intestinal e hepática, levantando, mais uma vez, preocupações sobre potenciais riscos à exposição de microplásticos.

Com estes achados, é possível inferir os possíveis impactos de micropartículas no sistema gastrointestinal sobre o cérebro, devido à existência da comunicação bidirecional no eixo intestino-cérebro, podendo influenciar na produção de neurotransmissores ou a integridade da barreira hematoencefálica. A presença direta de MPs no sistema nervoso foi documentada em Amato-Lourenço *et al.* (2024), que coletaram amostras de nervos bulbo olfatório em indivíduos submetidos à necropsopia de rotina. Uma das vias de entrada sugeridas é pela respiração, fundamentada na anatomia local e na utilização dessa rota para aplicação de fármacos. No entanto, os autores também hipotetizaram o transporte de microplásticos pela corrente sanguínea, atravessando a barreira hematoencefálica. Portanto, não se chegou a uma conclusão definitiva quanto à via de entrada. No entanto, foi destacada a necessidade de estudos mais aprofundados para elucidar os possíveis impactos na saúde humana.

Na figura 3, foi feita um diagrama indicando como o microplásticos atuam no organismo, desde as vias de exposição, até os impactos em humanos registrados na literatura. Em resumo, os MPs, monômeros e aditivos, classificados como poluentes, podem por meio de diferentes fontes, entre eles alimentos, cosméticos e poeira, e vias de exposição, ingestão, dérmica e respiratória, são transportadas para dentro do organismo, os impactos destes contaminantes geram efeitos como estresse oxidativo, inflamações e maior permeabilidade vascular.

Figura 3. Visão geral de potenciais rotas de exposição de microplásticos e impactos toxicológicos no corpo.



Fonte: Adaptado de Makhdoumi *et al* (2023).

7. Conclusão

Apesar dos avanços nas pesquisas, a literatura sobre a bioacumulação de microplásticos em cadeia trófica não é aprofundada o suficiente, especialmente como isso pode afetar os seres humanos, impedindo a formulação de respostas conclusivas.

Contudo, existem estudos que hipotetizam e mostram os possíveis impactos tanto em níveis tróficos inferiores quanto em seres humanos, representando um progresso inicial. Estas investigações são fundamentais para estabelecer dados mais concretos e a melhor compreensão da dimensão do impacto associado à poluição de MPs. Além disso, existe carência de estudos que explorem os efeitos dos microplásticos a longo prazo, e a de nanoplásticos, partículas de dimensão inferior a 1 micrômetro, encontra-se menos desenvolvida ainda.

Adicionalmente, com o crescente interesse sobre o assunto e descobertas sobre o microplástico em ecossistemas ambientais e em produtos de consumo humano, reforça-se a urgência de regulamentações e vigilância sanitária. Pela ubiquidade dos microplásticos em

diversos ambientes e em várias fontes de alimentos, é de interesse coletivo o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à diminuição do uso de plásticos e ao combate à poluição ambiental, iniciativas estas que se alinham com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela ONU.

Referências bibliográficas:

Associação Brasileira da Indústria de PET (Abipet). **Reciclagem**. São Paulo, [s.d]. Disponível em: <https://abipet.org.br/reciclagem/#>. Acesso em: 23 de jun. 2025.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, 2021. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama_bkp/. Acesso em: 19 maio 2025.

AKHBARIZADEH, R. *et al.* **Investigating a probable relationship between microplastics and potentially toxic elements in fish muscles from northeast of Persian Gulf. Environmental pollution**, *Environmental Pollution*, v. 232, p. 169-176, 2018. DOI 10.1016/j.envpol.2017.09.028. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749117323291?via%3Dihub#abs0020>. Acesso em: 22 jun. 2025.

AMATO-LOURENÇO, L. F. *et al.* **Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. Environmental health**, *JAMA Network Open*, 2024. DOI 10.1001/jamanetworkopen.2024.40018. Disponível em: <https://jamanetwork.com/journals/jamanetworkopen/fullarticle/2823787>. Acesso em: 26 jun. 2025.

ANDRADY, A. A. **The plastic in microplastics: A review. Marine Pollution Bulletin**, v. 118, n.1-2, p 1-4, 2017. DOI 10.1016/j.marpolbul.2017.01.082. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X1730111X?via%3Dihub#s0010>. Acesso em: 15 jun. 2025.

ARAÚJO, A. P. C. *et al.* **Microplastic ingestion induces behavioral disorders in mice: A preliminary study on the trophic transfer effects via tadpoles and fish. Journal of Hazardous Materials**, v. 401, Artigo 123263, 2021. DOI 10.1016/j.jhazmat.2020.123263. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420312528?via%3Dihub>. Acesso em: 2 jun. 2025

ARTHUR, C. *et al.* **Proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects, and fate of microplastic marine debris**. Tacoma: NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R 30, 2009. Disponível em: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/2509/noaa_2509_DS1.pdf. Acesso em: 26 maio 2025.

AVIO, C. G. *et al.* **Plastics and microplastics in the oceans: from emerging pollutants to emerged threat. Marine Environmental Research**, v. 128, p. 2-11, 2017. DOI: 10.1016/j.marenvres.2016.05.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141113616300733?via%3Dihub>. Acesso em: 27 maio 2025.

BARBOZA, L. G. A. *et al.* **Microplastics cause neurotoxicity, oxidative damage and energy-related changes and interact with the bioaccumulation of mercury in the European seabass, Dicentrarchus labrax (Linnaeus, 1758). Aquatic Toxicology**, v. 195, p. 49 - 57, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.12.008>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166445X17303776?via%3Dihub#abs0005>. Acesso em: 24 mar. 2025.

BORA, S. S. *et al.* **Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks.** *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, Arizona State University, Estados Unidos, v. 14, Artigo 1492759, 2024. DOI 10.3389/fcimb.2024.1492759. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/cellular-and-infection-microbiology/articles/10.3389/fcimb.2024.1492759/full>. Acesso em: 2 maio 2025.

BRASIL, MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Guia alimentar para a população brasileira 2. ed.** Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2014. cap. 3, p. 83. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-brasil/publicacoes-para-promocao-a-saude/guia_alimentar_populacao_brasileira_2ed.pdf/view. Acesso em: 19 maio 2025.

CARPENTER, E. J. *at al.* **Polystyrene spherules in coastal waters.** *Science*, Washington, v. 178, n. 4062, p. 749–750, 1972. DOI: 10.1126/science.178.4062.749. Acesso em: 19 maio 2025.

COLE, M. *et al.* **Microplastic ingestion by zooplankton.** *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 12, p. 6646-6655, 2013. DOI 10.1021/es400663f. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es400663f>. Acesso em: 23 jun. 2025.

DANTAS, N. C. F. M. *et al.* **Plastic intake does not depend on fish eating habits: Identification of microplastics in the stomach contents of fish on an urban beach in Brazil.** *Marine Pollution Bulletin*, v. 153, Artigo 110959, 2020. DOI 10.1016/j.marpolbul.2020.110959. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X20300771?via%3Dihub>. Acesso em: 16 maio 2025.

DENG, Y. *et al.* **Microplastics release phthalate esters and cause aggravated adverse effects in the mouse gut.** *Environmental International*, v. 143, Artigo 105916, 2020. DOI 10.1016/j.envint.2020.105916. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020318717?via%3Dihub#b0335>. Acesso em: 24 jun. 2025.

DING, J. *et al.* **Accumulation, tissue distribution, and biochemical effects of polystyrene microplastics in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*).** *Environmental Pollution*, v. 238, P. 134-143, 2018. DOI 10.1016/j.envpol.2018.03.001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749117342355>. Acesso em: 22 jun. 2025.

EMBRAPA. **O mercado consumidor de produtos da aquicultura no Brasil.** *Boletim de pesquisa e desenvolvimento*, n. 28, Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1156970/1/Boletim-PD28.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025

FENDALL, L. S.; SEWELL, M. A. **Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers.** *Marine Pollution Bulletin*, v. 58, n. 4, p. 538-540, 2009. DOI 10.1016/j.marpolbul.2009.04.025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X09001799?pes=vor&utm_source=acs&getft_integrator=acs#aep-section-id10. Acesso em: 24 jun. 2025.

GALLO, F. *et al.* **Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures.** *Environmental Sciences Europe*, v. 30, Artigo 25, 2018. DOI 10.1186/s12302-018-0139-z. Disponível em: <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-018-0139-z#Fn6>. Acesso em: 29 maio 2025.

GESAMP (JOINT GROUP OF EXPERTS ON THE SCIENTIFIC ASPECTS OF MARINE ENVIRONMENTAL PROTECTION). **Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part two of a global assessment.** Edição de P. J. Kershaw e C. M. Rochman. Londres: IMO, 2016. (*Reports and Studies GESAMP*, n. 93, p. 17-18). Disponível em: <http://www.gesamp.org/publications/microplastics-in-the-marine-environment-part-2>. Acesso em: 22 maio 2025.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). **Plastics: environmental aspects - state of knowledge and methodologies.** ISO/TR 21960:2020. Genebra: ISO, 2020. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/72300/65b73cb6030f442aa1bd7eaa97386292/ISO-TR-21960-2020.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

IVAR DO SUL, J. A. *et al.* **Here, there and everywhere. Small plastic fragments and pellets on beaches of Fernando de Noronha (Equatorial Western Atlantic).** *Marine Pollution Bulletin*, v. 58, n. 11, p. 1481-1485, 2009. DOI 10.1016/j.marpolbul.2009.05.004. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19486997/>. Acesso em: 6 jun. 2025.

JUSTINO, A. K. S. *et al.* **From prey to predators: Evidence of microplastic trophic transfer in tuna and large pelagic species in the southwestern Tropical Atlantic.** *Environmental Pollution*, v. 327, Artigo 121532, 2023. DOI 10.1016/j.envpol.2023.121532. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749123005341?via%3Dihub>. Acesso em: 31 maio 2025.

KARAMI, A. *et al.* **Microplastic and mesoplastic contamination in canned sardines and sprats.** *Science of the Total Environment*, v. 621, P. 108-115, 2018. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.09.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717323471?via%3Dihub#s0060>. Acesso em: 19 jun. 2025.

KOELMANS, A. A. **All is not lost: deriving a top-down mass budget of plastic at sea.** *Environmental Research Letters*, v. 12, Artigo 114022, 2017. DOI 10.1088/1748-9326/aa9500. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa9500#erlaa9500s2>. Acesso em: 13 jun. 2025.

LENZ, R. *et al.* **A critical assessment of visual identification of marine microplastic using Raman spectroscopy for analysis improvement.** *Marine Pollution Bulletin*, v. 100, p 82-90, 2015. DOI 10.1016/j.marpolbul.2015.09.026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X15300424?via%3Dihub#s0005>. Acesso em: 21 jun. 2025.

LU, L. *et al.* **Polystyrene microplastics induce gut microbiota dysbiosis and hepatic lipid metabolism disorder in mice.** *Science of the Total Environment*, v. 631 - 632, p. 421-429, 2018. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.03.051. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718308064?pes=vor&utm_source=acs&getft_integrator=acs#bb0240. Acesso em: 26 jun. 2025.

MAKHDOUMI, P. *et al.* **A review of microplastic pollution in commercial fish for human consumption.** *Reviews on Environmental Health*, v. 38, n. 2, p. 243-255, 2023. DOI 10.1515/reveh-2021-0103. Disponível em: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/reveh-2021-0103/html>. Acesso em: 2 maio 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos de desenvolvimento sustentável.** Nova Iorque: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 3 jun. 2025.

PEGADO, T. d S. e S. *et al.* **First evidence of microplastic ingestion by fishes from the Amazon River estuary.** *Marine Pollution Bulletin*, v. 133, p. 814 - 821, 2018. DOI 10.1016/j.marpolbul.2018.06.035. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X18304326?casa_token=3EaKQK05sisAAAAA:QJ89g1a7HT96WvP_1QVlZQjHg1n1CTcvRszKKpDeFX4_2LsMcg_aCsHYk8-9lOHyaqSfXLRFA. Acesso em: 19 maio 2025.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE MATERIAL PLÁSTICO, TRANSFORMAÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAL PLÁSTICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDIPLAST). **Tipos de plásticos**, São Paulo, [s.d]. Disponível em: <https://www.sindiplast.org.br/tipos-de-plasticos/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

RAGUSA, A. *et al.* **Plasticenta: first evidence of microplastics in human placenta.** *Environment International*, v. 146, Artigo 106274, 2021. DOI 10.1016/j.envint.2020.106274. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020322297>. Acesso em: 16 maio 2025.

ROCHMAN, C. M. *et al.* **Long-Term Field Measurement of Sorption of Organic Contaminants to Five Types of Plastic Pellets: Implications for Plastic Marine Debris.** *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 4, p. 1619-1627, 2013. DOI 10.1021/es303700s. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es303700s>. Acesso em: 8 jun. 2025.

SAPEA (Scientific Advice for Policy by European Academics). **A scientific perspective on micro-plastics in nature and society.** Bruxelas, 2019. Disponível em: <https://scientificadvice.eu/advice/a-scientific-perspective-on-microplastics-in-nature-and-society/>. Acesso em: 3 jun. 2025.

SONG, Y. K. *et al.* **A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples.** *Marine Pollution Bulletin*, v. 93, p. 115-121, 2015. DOI 10.1016/j.marpolbul.2015.01.015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X15000314?via%3Dihub#s0010>. Acesso em: 21 jun. 2025.

TEUTEN, E. L. *et al.* **Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife.** *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 364, ed. 1526, p. 2027-2045, 2009. DOI 10.1098/rstb.2008.0284. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2873017/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

THOMPSON, R. C. *et al.* **Lost at sea: Where is all the plastic?**. *Science*, v. 304, n. 5672, p. 838, 2004. DOI 10.1126/science.1094559. Disponível em: https://www.science.org/doi/10.1126/science.1094559?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori:rid:crossref.org&rfr_dat=cr_pub%20%20pubmed. Acesso em: 16 maio 2025.

THOMPSON, R. C. *et al.* **Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends**. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p. 2153-2166, 2009. DOI 10.1098/rstb.2009.0053. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2009.0053>. Acesso em: 22 maio 2025.

WRIGHT, S. L. *et al.* **Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport**. *Environment International*, v. 136, Artigo 105411, 2020. DOI 10.1016/j.envint.2019.105411. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019330351?via%3Dihub>. Acesso em: 18 maio 2025.

WRIGHT, S. L.; KELLY, F. J. **Plastic and Human Health: A Micro Issue?**. *Environmental Science and Technology*, v. 51, n. 12, p 6631-6639, 2017. DOI 10.1021/acs.est.7b00423. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b00423>. Acesso em: 6 jun. 2025.