

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO
DA NATUREZA

Thaiane Cantarino Costa

Poluição plástica e seus efeitos em organismos aquáticos

Juiz de Fora

2024

Thaiane Cantarino Costa

Poluição plástica e seus efeitos em organismos aquáticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Conservação da Natureza. Área de concentração: Processos Ecológicos e Conservação da Natureza.

Orientadora: Profa. Dra. Simone Jaqueline Cardoso

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cantarino Costa, Thiane.

Poluição plástica e seus efeitos em organismos aquáticos /

Thiane Cantarino Costa. -- 2024.

72 p. : il.

Orientadora: Simone Jaqueline Cardoso

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal

de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de

Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza, 2024.

1. Ecosistemas aquáticos. 2. Biodiversidade aquática. 3. Danos toxicológicos. 4. Contaminantes emergentes. 5. Poluentes emergentes. I. Jaqueline Cardoso, Simone, orient. II. Título.

Thaiane Cantarino Costa

Poluição plástica e seus efeitos em organismos aquáticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Conservação da Natureza. Área de concentração: Comportamento, Ecologia e Sistemática.

Aprovada em 26 de novembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Simone

Jaqueline Cardoso -

Orientadora Universidade

Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Haroldo Lobo dos Santos Nascimento

Universidade Federal de

Juiz de Fora

Profa. Dra. Bianca do Amaral

Parque Tecnológico de

Itaipu

Juiz de Fora, 07/11/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Simone Jaqueline Cardoso, Professor(a)**, em 26/11/2024, às 13:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bianca do Amaral, Usuário Externo**, em 26/11/2024, às 14:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Haroldo Lobo dos Santos Nascimento, Servidor(a)**, em 26/11/2024, às 16:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uf (www2.uf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2087950** e o código CRC **DA15B000**.

Dedico esta dissertação à minha família e a todos os meus amigos e minha orientadora do Laboratório de Ecologia do Plâncton (UFJF)

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação só foi possível graças ao apoio e contribuições de muitas pessoas, à Universidade Federal de Juiz de Fora e ao Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Conservação da Natureza aos quais estou inserida, bem como a agência de fomento CAPES, que financiou essa pesquisa. A todos sou profundamente grata.

Agradeço à minha orientadora, Simone Jaqueline Cardoso, por ter aceitado de coração aberto esse projeto, apoiando-me em minhas decisões. Além disso, agradeço a amizade e confiança desenvolvida nesse período, e todo o suporte dado a mim em momentos difíceis que foram essenciais para o desenvolvimento desse estudo e para o meu crescimento acadêmico profissional.

Agradeço imensamente aos meus amigos e colegas do Laboratório de Ecologia do Plâncton, pelo apoio, pelas trocas e pela amizade que construímos ao longo desses dois anos, onde criamos diferentes parcerias, e juntos crescemos como grupo. Hoje, não consigo ver essa jornada sem o abraço, os sorrisos e os cafés que trocamos. Aqui agradeço especialmente a Nathália, por ter sido minha dupla durante esses dois anos, por ter me dado conselhos sobre a vida acadêmica, por ter compartilhado sua experiência de bancada comigo e por ter se tornado uma amiga pessoal. Agradeço também a Karina e a Vitória, que são como minhas irmãs mais novas, mas que mesmo assim, me ajudaram nos experimentos, a pensar soluções práticas para os problemas e por sempre me darem conselhos sobre “deixar fluir” e “desapegar” das coisas; com elas aprendi que existem situações às quais não podemos controlar e que devemos dar o nosso melhor, mas sem comprometer a nossa saúde mental. Agradeço também a Thaís, por ser uma estudante muito dedicada, por ter me ajudado na reta final dos experimentos, que foram um desafio para mim. Agradeço à Beatriz e ao Pedro, por terem me convidado a fazer parte dos seus artigos, o que também foi uma experiência enorme para mim como profissional, além de serem pessoas muito queridas que vou levar comigo para sempre.

Agradeço também a todos os professores e colaboradores que contribuíram direta ou indiretamente para o andamento desta dissertação, seja pelos aprendizados em disciplinas oferecidas na Pós-Graduação, ou pelas discussões geradas que me fizeram refletir a respeito do meu trabalho.

Agradeço também aos meus familiares e amigos pessoais por estarem sempre ao meu lado, acreditando em mim e me incentivando a seguir em frente, mesmo quando parecia

impossível seguir. Agradeço à minha mãe, por todo amor dedicado, ao suporte emocional e encorajamento ao longo desse momento. Agradeço também a minha vó e ao meu irmão que mesmo estando mais afastados da minha rotina diária, sei que sempre torceram por mim. Sem vocês, eu não estaria aqui.

Por fim, agradeço em especial ao Marcelo, a pessoa com a qual eu divido a vida hoje, que cuidou de mim nos momentos difíceis, que acolheu as minhas dores e que teve paciência para lidar com as oscilações de humor que tive durante esse processo. Sei que foi um momento confuso para nós, mas que vencemos como casal. Agradeço também ao Marcelo por ter me dado dicas de como prosseguir com os experimentos, sempre me ajudando a pensar novas estratégias. Obrigada Marcelo por estar em minha vida, você é a minha sorte.

“A massa que faz o pão, vale a luz do teu suor.
Lembra que o sono é sagrado e alimenta de
horizontes, o tempo acordado, de viver” (Amor
de Índio, Beto Guedes).

RESUMO

Os plásticos são polímeros sintéticos derivados de combustíveis fósseis, com alta durabilidade e baixo custo de produção, o que permitiu a criação de múltiplos utensílios versáteis para a rotina humana. No entanto, os acúmulos desses resíduos nos ambientes impactam processos geológicos e biológicos, além de conferirem risco à saúde humana, uma vez que, a toxicidade dos materiais plásticos tem o seu potencial agravado devido aos produtos químicos associados, como Bisfenol A e ftalatos. Estes produtos químicos desencadeiam mecanismos relacionados ao estresse oxidativo e distúrbios do metabolismo em inúmeros organismos, incluindo seres humanos. São observados também inúmeros impactos nos ambientes, especialmente aos aquáticos, pois estes recebem detritos plásticos oriundos de atividades humanas como a pesca, agropecuária, indústria e turismo, que ao todo geram mais de 430 milhões de toneladas de lixo plástico nos ecossistemas anualmente. Esses resíduos plásticos, quando expostos ao ambiente, liberam micropartículas oriundas de processos bióticos e abióticos que levam a lixiviação do ambiente terrestre, escoando superficialmente ou por meio dos lençóis freáticos para os ecossistemas aquáticos. Outras fontes são o esgoto doméstico e precipitação. Após atingirem lagos, lagoas, rios e estuários, essas partículas podem se acumular nos sedimentos ou serem transportadas para os oceanos. Diante dos inúmeros problemas associados à poluição plástica atualmente, principalmente envolvendo os ambientes aquáticos e seus efeitos toxicológicos na biodiversidade, o objetivo geral desta dissertação foi avaliar os efeitos de microplástico em organismos aquáticos. Os objetivos específicos foram (1) avaliar os efeitos causados pela poluição plástica nos animais dos ambientes costeiros através de uma revisão sistemática (capítulo 1); e (2) avaliar experimentalmente os efeitos toxicológicos de microplásticos em microcrustáceos de água doce (capítulo 2). Ao final deste trabalho, esperamos contribuir com dados relevantes para compreensão dos impactos da poluição plástica em diferentes organismos aquáticos, incentivando a implementação de políticas públicas e estratégias de educação ambiental voltadas ao combate da poluição causada por esse contaminante emergente.

Palavras-chave: ecossistemas aquáticos; biodiversidade aquática; danos toxicológicos; contaminantes emergentes

ABSTRACT

Plastics are synthetic polymers derived from fossil fuels, with high durability and low production costs, which has allowed the creation of multiple versatile utensils for human routine. However, the accumulation of this waste in the environment impacts geophysical and biological processes, in addition to posing a risk to human health, since the toxicity of plastic materials is potentially aggravated by associated chemicals, such as Bisphenol A and phthalates, which trigger mechanisms related to oxidative stress and metabolic disorders in numerous organisms, including humans. Numerous impacts on the environment are also observed, especially in aquatic environments, as they receive plastic debris from human activities such as fishing, agriculture, industry and tourism, which together generate more than 430 million tons of plastic waste in ecosystems annually. When exposed to the environment, these plastic wastes release microparticles from leaching processes that occur in terrestrial environments, which run off on the surface or through groundwater into aquatic ecosystems. Other sources include domestic sewage and precipitation. After reaching lakes, ponds, rivers, and estuaries, these particles can accumulate in sediments or be transported to the oceans. Given the numerous problems currently associated with plastic pollution, especially involving aquatic environments and their toxicological effects on biodiversity, the general objective of this dissertation was to evaluate the effects of microplastics on aquatic organisms. The specific objectives were (1) to evaluate the effects caused by plastic pollution on animals in coastal environments through a systematic review (chapter 1); and (2) to experimentally evaluate the toxicological effects of microplastics on freshwater microcrustaceans (chapter 2). At the end of this work, we hope to contribute with relevant data to understanding the impacts of plastic pollution on different aquatic organisms, encouraging the implementation of public policies and environmental education strategies aimed at combating pollution caused by this emerging contaminant.

Keywords: aquatic ecosystems; aquatic biodiversity; toxicological damages; emerging contaminants.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1: Efeitos da poluição plástica na fauna marinha costeira

- Figura 1:** Dados cienciométricos sobre as publicações relacionando efeitos toxicológicos desencadeados nos animais em decorrência da presença de plástico23
- Figura 2:** Relação dos artigos observacionais e experimentais, ambientes em que foram realizados e os animais mais utilizados nos estudos.....24
- Figura 3:** Relação dos animais inventariados em diferentes fases do ciclo de vida e os respectivos órgãos afetados pelos itens plásticos reportados nos estudos observacionais....26
- Figura 4:** Relação de animais inventariados em diferentes fases do ciclo de vida e os efeitos causados pelos itens plásticos reportados em estudos experimentais.....27
- Figura 5:** Dados sobre os itens plásticos observados em estudos observacionais.....32
- Figura 6:** Dados sobre os itens plásticos observados em estudos experimentais.....33

Capítulo 2: Efeitos toxicológicos de microplásticos em espécies exótica e nativa de microcrustáceos de água doce

- Figura 1:** Carta controle (KCI).....47
- Figura 2a:** Efeito dos diferentes tratamentos de glitter na mortalidade de *Ceriodaphnia silvestrii* em 24 horas.....48
- Figura 2b:** Análise da mortalidade de *Ceriodaphnia sillvestrii* expostos a diferentes concentrações de glitter em 48 horas.....49
- Figura 4:** Danos morfológicos em *Ceriodaphnia silvestrii*.....49

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1: Efeitos da poluição plástica na fauna marinha costeira

Tabela 1: Efeitos toxicológicos desencadeados nos animais utilizados nos ensaios experimentais.....31

Tabela 2: Quantidade de plástico encontrada ou associada aos animais reportados nos estudos.....35

Capítulo 2: Efeitos toxicológicos de microplásticos em espécies exótica e nativa de microcrustáceos de água doce

Tabela 1: Soluções testadas na carta controle.....46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR - Norma Brasileira

mg/L - Miligrama por litro

µg/L - Micrograma por litro

g - Grama

LC50 - Concentração letal em 50 % da população

LISTA DE SÍMBOLOS

μ - Micrômetro

< - Inferior

> - Superior

$^{\circ}\text{C}$ - Graus Celsius

KCl - Cloreto de potássio

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	13
CAPÍTULO 1. EFEITOS DA POLUIÇÃO PLÁSTICA NA FAUNA MARINHA	
COSTEIRA.....	16
1. INTRODUÇÃO.....	19
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3. RESULTADOS.....	22
4. DISCUSSÃO.....	37
5. CONCLUSÃO.....	41
CAPÍTULO 2. EFEITOS TOXICOLÓGICOS DE MICROPLÁSTICOS EM ESPÉCIES	
EXÓTICA E NATIVA DE MICROCRUSTÁCEOS DE ÁGUA	
DOCE.....	42
1. INTRODUÇÃO.....	43
2. MATERIAS E MÉTODOS.....	45
3. RESULTADOS.....	48
4. DISCUSSÃO.....	51
5. CONCLUSÃO.....	52
6. CONCLUSÃO GERAL.....	54
APÊNDICE A. MATERIAL SUPLEMENTAR	56
RREFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os plásticos sintéticos são polímeros de cadeias longas originados do petróleo e gás natural, sendo classificados como polietileno, polipropileno, poliéster, poliamida e acrílico (Hidalgo-Ruz et al., 2012). Estes materiais assumem diferentes densidades moleculares de acordo com suas propriedades químicas (Bond et al., 2018).

Os produtos plásticos fazem parte da vida humana diariamente e são amplamente utilizados em diferentes setores econômicos devido às suas propriedades como durabilidade e versatilidade (Galafassi, Nizzetto & Volta, 2019). O primeiro plástico sintético (baquelite) foi descoberto no início do século XX (Rasmussen, 2021). Sua ascensão se deu após a Segunda Guerra Mundial, devido as suas propriedades físico-químicas, que permite diferentes aplicações (Kedzierski et al., 2020). Com isso, a produção em larga escala deste produto só aconteceu por volta dos anos de 1950 (Geyer, Jambeck & Law, 2017), superando outros materiais confeccionados pelo homem, como o vidro (Meikle, 1992).

Atualmente, o aumento do uso de materiais plásticos em todo o mundo, associado ao gerenciamento inadequado dos resíduos pós-consumo, tem ocasionado uma significativa poluição plástica em vários ecossistemas terrestres e aquáticos (Lebreton et al., 2017). No ambiente encontramos diferentes escalas de tamanho dos fragmentos plásticos, como macroplástico, mesoplástico, microplásticos e nanoplásticos (Thompson 2004).

Os macroplásticos são itens maiores que 20 mm, podendo ser observada em todos os ambientes, se tornando uma das formas mais preocupantes de poluição plástica (Nelms et al., 2017). Devido ao seu tamanho, esses itens podem ser categorizados quanto a seu uso original, como garrafas, embalagens, itens de pesca ou detritos relacionados ao esgoto, e essas partículas podem entrar no meio ambiente por fontes oceânicas, incluindo resíduos de pesca e transporte marítimo, e fontes terrestres em que a poluição plástica é originada da indústria, descarte inadequado dos materiais, esgoto e águas pluviais (Cunningham & S. P. Wilson 2003; Verlis & Wilson, 2020). Esses materiais no ambiente se decompõem em partículas de mesoplásticos.

Os mesoplásticos são fragmentos que medem de 5 a 25 mm, que afetam diretamente os animais aquáticos por meio da ingestão e asfíxia (Lacerda et al., 2019) além disso, esses fragmentos podem servir como substrato artificial para novos organismos, podendo se transformar em um biofilme (Barnes 2002, Erni-Cassola et al., 2020). Esse novo ambiente vem sendo classificado como “Plastisfera” (Zettler et al., 2013). Quando expostos a intemperes provocados por agentes bióticos e abióticos a um longo período, esses materiais se decompõem em detritos menores, na escala de microplástico (Jambeck et al., 2015).

Os microplásticos por definição são divididos quanto a sua origem, podendo ser primária, que são aqueles produtos manufaturados menores que 5 mm utilizados na confecção de materiais têxteis, medicamentos e de cuidado pessoal como esfoliantes faciais e corporais (Cole et al., 2011; Browne, 2015), ou secundários, oriundos da degradação de partículas plásticas grandes por agentes físicos, químicos e interações biológicas (Thompson et al., 2009; Galgani et al., 2013). A estas micropartículas são adicionadas no momento da confecção de itens plásticos, os aditivos, que são responsáveis por manter as propriedades do material que será comercializado (Deanin, 1975). Os aditivos mais comuns são os Bisfenol A, nonilfenóis e retardantes de chama bromados (BFRs), como PBDEs (Fred-Ahmadu et al., 2020). Além disso, também adsorvem metais e outros contaminantes de preocupação emergente como os micropoluentes orgânicos tais como, PAHs, PCBs e DDTs (Frias, Sobral & Ferreira, 2010; Zhu et al., 2023), mas o comportamento de adsorção dependerá do tipo da propriedade química e o tipo de polímero envolvidos (Yu et al., 2021).

Os nanoplásticos são partículas menores que 1000 nm de tamanho, possivelmente todos os materiais que venham a se decompor, chegam na faixa de tamanho de nanoplástico antes da mineralização completa (Napper & Thompson, 2020).

Nos ambientes marinhos as principais fontes de poluição plástica provêm de atividades terrestres, especialmente ligadas à indústria, turismo, operações portuárias e atividades domésticas (Andrady et al., 2017). Nas regiões costeiras, as principais fontes de poluição estão relacionadas à proximidade com áreas urbanizadas, o que resulta em um acúmulo significativo de itens provenientes principalmente de zonas industriais e urbanas (Thushari & Senevirathna, 2020).

Os ecossistemas de água doce são o principal destino de diferentes tipos de poluentes liberados em uma bacia hidrográfica, especialmente por sua localização geográfica em vales e terrenos com menor altitude, nestes locais são descartados incorretamente itens plásticos, que serão transportados através das águas pluviais para os corpos de água, tais como, rios, lagos, lagoas e pântanos (Gasperi et al., 2014) Além disso, nesses ambientes a contaminação por itens plásticos vem das descargas de esgotos doméstico e resíduos industriais, e também de atividades agrícolas (Kalciková et al., 2017).

Os danos causados pela poluição plástica à fauna aquática é observada nas taxas de ingestão e no emaranhamento afetando o ciclo de vida de tartarugas, mamíferos e aves marinhas (Gall & Thompson, 2015). Para o zooplâncton são relatados danos relacionados à taxa de alimentação, taxa de fecundidade e sobrevivência (Cole et al., 2013; Lee et al., 2013). Ademais, todos os níveis tróficos são ameaçados, por apresentarem danos genéticos, imunológicos e

bloqueios no sistema gastrointestinal, que resulta em morte prematura dos organismos expostos a poluição plástica (Peng et al., 2020; Biswas & Pal, 2024).

Para compreender melhor o cenário da poluição plástica e quais os danos causados à biodiversidade, estudos de revisão sistemática são sugeridos, a fim de compreender os padrões e tendências globais dos danos toxicológicos, auxiliado a isso, estudos experimentais podem confirmar os dados observados na literatura, bem como, acrescentar novos dados, testando uma relação de causa e efeito. Com isso, essa dissertação tem por objetivo apresentar os efeitos da poluição plástica em organismos aquáticos, através de uma revisão sistemática que aborda os efeitos da poluição plástica na fauna marinha (Capítulo 1), e através de um experimento de laboratório que testa os efeitos ecotoxicológicos dos microplásticos em microcrustáceo de água doce (Capítulo 2).

CAPÍTULO 1

EFEITOS DA POLUIÇÃO PLÁSTICA NA FAUNA MARINHA COSTEIRA

Submetido na Environmental Monitoring and Assessment. A3 e FT 2.9, como “Effects of plastic pollution on coastal marine fauna”

Thaiane Cantarino Costa^{1,2}; Beatriz Corrêa Thomé de Deus¹; Leslie Nascimento Altomari³; Emília Marques Brovini⁴; Simone Jaqueline Cardoso^{1,2*}

¹ Laboratory of Plankton Ecology– LABEP, Department of Zoology, Federal University of Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora, MG, 36036-900, Brazil

² Postgraduate Program in Biodiversity and Nature Conservation, Institute of Biology, Federal University of Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora, MG, 36036-900, Brazil

³ Postgraduate Program in Biological Sciences, National Museum, Federal University of Rio de Janeiro, Quinta da Boa Vista, São Cristóvão, Rio de Janeiro, RJ, 20940040, Brazil

⁴ Postgraduate Program in Environmental Engineering, Federal University of Ouro Preto, Campus Universitario, Morro do Cruzeiro, 35400-000 Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil

RESUMO

Nos últimos anos a poluição plástica vem ganhando atenção devido à presença em todos os ecossistemas. A disponibilidade dos plásticos no ecossistema costeiros coloca em risco a biodiversidade aquática costeira. Estudos recentes apresentam dados sobre a forma de ingestão e efeitos toxicológicos das partículas, no entanto, informações são incipientes para entender como os organismos aquáticos respondem a esse estresse, e seus efeitos a longo prazo. Neste trabalho realizamos uma revisão sistemática com o objetivo de avaliar os efeitos causados pela poluição plástica nos animais dos ambientes costeiros. Realizamos as buscas utilizando a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-analysis*) nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus*, *PubMed* e *Scielo*, em todo período histórico até outubro de 2021. Foram removidos artigos duplicados e, posteriormente, foram analisados título, resumo e palavras-chave. Por fim, foi realizada a leitura completa dos artigos para construir o banco de dados. Ao todo foram selecionados 160 artigos, divididos em observacionais (n = 131) e experimentais (n = 29). Houve um aumento no número de publicações nos últimos cinco anos, sendo Brasil, Estados Unidos e China os países que mais publicaram sobre o assunto. Estuários, praias e costa, foram os locais mais estudados e moluscos, peixes e crustáceos, os grupos de animais mais avaliados. Quantitativamente, microplásticos foram as frações dominantes, constituídos principalmente de polietileno e polipropileno, nas cores branco e azul. Os microplásticos tiveram origens principalmente de itens de pesca, sacolas e garrafas plásticas. Em relação à biota, os maiores efeitos dos plásticos observados nos animais foram, mortalidade e danos na ingestão, no crescimento, reprodução e processos fisiológicos. Nossos resultados trazem evidências de que o aumento da poluição por resíduos plásticos coloca em risco a biota aquática costeira. Na tentativa de frear a poluição plástica, novas políticas públicas a respeito dos plásticos de uso único vêm sendo implementada por diferentes nações.

Palavras-chave: Contaminantes emergentes; polímeros; microplástico; efeitos toxicológicos; zona costeira; biota aquática; animais marinhos.

ABSTRACT

In recent years, plastic pollution has been gaining attention due to its presence in all ecosystems. The availability of plastics in coastal ecosystems puts coastal aquatic biodiversity at risk. Recent studies present data on the form of ingestion and toxicological effects of particles; however, information is incipient to understand how aquatic organisms respond to this stress, and its long-term effects. In this work, we carried out a systematic review with the objective of evaluating the effects caused by plastic pollution on animals in coastal environments. We carried out searches using the PRISMA methodology (Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-analysis) in the Web of Science, Scopus, PubMed and Scielo databases, in the entire historical period until October 2021. Duplicate articles were removed and, subsequently, title, abstract and keywords were analyzed. Finally, the articles were read in full to build the database. In total, 160 articles were selected, divided into observational ($n = 131$) and experimental ($n = 29$). There has been an increase in the number of publications in the last five years, with Brazil, the United States and China being the countries that published the most on the subject. Estuaries, beaches and coasts were the most studied locations, and mollusks, fish and crustaceans were the most evaluated animal groups. Quantitatively, microplastics were the dominant fractions, consisting mainly of polyethylene and polypropylene, in white and blue colors. Microplastics originated mainly from fishing gear, bags and plastic bottles. Regarding biota, the greatest effects of plastics observed on animals were mortality and damage to ingestion, growth, reproduction and physiological processes. Our results provide evidence that the increase in plastic waste pollution puts coastal aquatic biota at risk. In an attempt to curb plastic pollution, new public policies regarding single-use plastics have been implemented by different nations.

Keywords: Emerging contaminants; polymers; microplastics; toxicological effects; coastal zone; aquatic biota; marine animals.

1. INTRODUÇÃO

Os plásticos são produtos manufaturados amplamente utilizados em diferentes setores econômicos ao redor do mundo (Galafassi, Nizzetto & Volta, 2019). Estima-se que em média 171 trilhões de partículas plásticas estavam presentes na superfície dos oceanos em 2023 (Eriksen et al., 2023). Acredita-se que essa quantidade possa aumentar, já que o volume de plásticos que pode fluir para os mares pode ultrapassar 20 milhões de toneladas por ano até 2040 (PNUMA, 2021). A presença desses materiais no ambiente é resultado de atividades humanas, como a pesca, a aquicultura e a navegação, sendo que seu transporte para os oceanos ocorre através de fluxos hidrológicos e atmosféricos (Lebreton et al., 2017).

Quando expostos aos diferentes ambientes, como o terrestre e o aquático, esses materiais sofrem degradação devido à temperatura, radiação solar e vento, além do intemperismo poder causar a redução no tamanho das de partículas (IUCN, 2021), causando danos na superfície das partículas plásticas, como, fraturas, lascas, sulcos, descoloração e liberação de compostos químicos (Bond *et al.*, 2018). Essas partículas são então classificadas em macrolásticos (> 20mm diâmetro), mesoplásticos (5 – 20 mm diâmetro), microplásticos (< 5 mm diâmetro) e nanoplásticos (1 µm até 1 nanômetro) (Thompson et al., 2004; Barnes et al., 2009), sendo compostas principalmente por politereftalato de etileno (PET), polietileno (PE), polipropileno (PP) e policloreto de vinila (PVC), classificados de acordo com a sua estrutura química, polaridade e aplicação (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Nos ecossistemas aquáticos, há uma variação na predominância dos polímeros, pois a densidade de cada um interfere no ambiente onde são encontrados. Polímeros de maior densidade (*e.g.*, poliamida) tendem a aderir nos sedimentos ocasionando a bioincrustação (Jones e Head, 2023). Já em ambientes aquáticos, espera-se encontrar em sua superfície materiais confeccionados com polímeros de baixa densidade de estrutura química, como polietileno e polipropileno (Gunaalan, Fabbri e Capolupo, 2020). Uma vez que as partículas entram nos ecossistemas, elas interagem com os organismos de diversas formas.

As interações acarretam lesões ao corpo do animal causados pelo emaranhamento, quando os fragmentos plásticos ficam presos nos bicos, nadadeiras e no pescoço, principalmente em relação aos macrolásticos que afetam a vida das tartarugas, mamíferos e aves marinhas (Gall & Thompson, 2015). Em relação a alimentação acidental de partículas plásticas, essas interações podem ocorrer de forma direta, quando o organismo confunde o material plástico com uma presa, e indireta, quando as partículas são ingeridas por filtração ou através da absorção pelos tecidos, pela transferência na cadeia trófica promovendo a

bioacumulação e biomagnificação levando a um aumento na concentração de contaminantes em organismos de níveis superiores. (Ryan et al., 2016; Miller et al., 2020). Ademais, todos os níveis tróficos são ameaçados por fragmentos plásticos de diferentes escalas de tamanho, causando danos genéticos e ao sistema imunológico, interferindo na absorção de nutrientes obtidos na alimentação, devido ao bloqueio no trato gastrointestinal (Gündogdu & Çevik, 2019, Bhatt & Chauhan, 2023).

Esses fatores resultam na morte prematura, diminuição no crescimento corporal e na fecundidade de muitos organismos (Peng et al., 2020; Biswas & Pal, 2024). Além disso, a poluição plástica tem sido associada a altas taxas de mortalidade, colocando algumas espécies em risco de extinção (Macleod et al., 2020). Outra interação significativa é a colonização de microrganismos na superfície de partículas plásticas, permitindo o deslocamento dessas comunidades e, conseqüentemente, aumentando as taxas de espécies invasoras (Sérvulo et al., 2023).

Em razão dos problemas associados à poluição plástica, o objetivo deste trabalho foi de apresentar um panorama global sobre a relação entre a poluição plástica e seus efeitos na biota aquática de zonas costeiras através de uma revisão sistemática.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Banco de dados

Para este estudo foram considerados apenas trabalhos realizados em ambientes costeiros, como praias, mangues, estuários, dunas, costões rochosos, lagoas costeiras, fiordes e deltas de rio. Parte dos dados foram obtidos através do banco de dados gerado por de Deus et al., 2024 (1405 artigos). No entanto, é importante ressaltar que de Deus et al., 2024 não abordaram os efeitos da poluição plástica em animais, objeto do nosso estudo.

Foram realizadas buscas nas bases de dados Web of Science, Scopus, Scielo e PubMed, considerando artigos em inglês, revisados por pares, publicados até 5 de outubro de 2021 utilizando o código de busca: (plastic OR macroplastic OR mesoplastic OR microplastic OR nanoplastic) AND (beach* OR dune OR estuar* OR mangrove OR coast* OR seashore OR seacoast OR shoreline OR litoral OR “rocky shore” OR “ocean cliff” OR “sea cliff” OR “river mouth” OR “river delta”).

A revisão sistemática foi realizada segundo a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-analysis*, Moher et al., 2015). A triagem dos artigos foi realizada em duas etapas: i) Análise do título, resumo e palavras-chave; e ii) Leitura

integral de cada artigo. O gerenciamento e a remoção de artigos duplicados foram realizados utilizando o Endnote® Web (Clarivate Analytics, 2023).

Os artigos selecionados para elegibilidade deveriam respeitar critérios de inclusão e de exclusão estabelecidos previamente. Artigos selecionados deveriam: (1) conter dados ou avaliação de plástico em regiões costeiras; (2) conter explicitamente dados demonstrando efeitos dos plásticos nos organismos; (3) serem realizados através de observações em campo ou exposição por meio de experimentos. Foram desconsiderados (1) artigos meramente metodológicos; (2) artigos realizados em regiões não costeiras; (3) dados obtidos através de organismos capturados em mar aberto ou afastados das zonas costeiras.

Análise qualitativa

Após a seleção dos estudos elegíveis pelos critérios de inclusão e exclusão, foram extraídas informações para as análises qualitativas. Para melhor avaliação e interpretação dos resultados, os artigos foram separados em dois grupos: “Estudos Observacionais” e “Estudos Experimentais”.

A partir dos estudos primários, foram extraídas informações sobre o ano de publicação dos estudos, os métodos de coleta, presença de poluição plástica, localidade das observações, incluindo coordenadas geográficas, países, cidades e o tipo de ambiente em que foram registradas. Nos casos em que os estudos traziam informações sobre a localidade, mas não disponibilizavam as coordenadas geográficas, estas foram obtidas com o auxílio dos programas GEOLocate (GEOLocate, 2024) e Google Maps (Google, 2024). Os ambientes mencionados nos estudos foram posteriormente classificados em estuários, praias, lagoas costeiras, fiordes, baías, mangues, deltas de rio, costões rochosos e pântanos salgados. Quando o tipo de ambiente não era mencionado no artigo, foi realizada a inclusão na categoria “costa”.

As informações sobre as características dos plásticos encontrados nos estudos primários foram organizadas de acordo com a tipologia predominante (*i.e.*, tipo de polímero constituinte), origem provável da partícula (*e.g.*, oriundos da degradação de itens de uso comercial como sacolas, garrafas, linhas de pesca), cor e tamanho das partículas, classificado em: macrolástico (> 20 mm), mesoplástico (5 – 20 mm), microplástico (< 5 mm) ou nanoplástico (1 µm até 1 nanômetro). Quando os estudos primários apresentavam múltiplos resultados para as categorias avaliadas (*e.g.*, tipologia, cor, formato, tamanho), foram considerados aqueles mais frequentes ou de maior abundância.

Em relação aos organismos afetados, foram extraídas informações a respeito do sexo, estágio de vida, tamanho, peso, órgãos afetados, número de indivíduos analisados, número de

indivíduos contaminados/afetados e número de fragmentos associados aos organismos. Foram considerados como afetados pela poluição plástica todos aqueles organismos que, de alguma forma, sofreram alterações em algum parâmetro biológico (*e.g.*, morfologia, reprodução, diversidade) como resposta à presença de plástico. Para facilitar a compreensão e discussão dos resultados, os organismos foram classificados em grupos artificiais abrangentes a fim de garantir a inclusão didática de todos os organismos citados nos estudos primários. Para os invertebrados foi utilizada a classificação de Brusca, Moore & Shuster, 2018 e para vertebrados a classificação de acordo com Hickman, 2018.

Nos artigos que compuseram os dados referentes a estudos observacionais, extraímos informações relacionadas ao local onde o animal foi encontrado, o estágio de vida em que se encontrava, seu peso, tamanho e sexo. Além disso, extraímos dados sobre a quantidade de plástico ingerida pelos animais, a proporção desse total que estava associada aos órgãos e o número de animais analisados em cada estudo.

Em relação aos artigos experimentais, foram extraídas informações a respeito da toxicologia do plástico nos animais, incluindo os tipos de tratamentos aplicados, as concentrações utilizadas, o tempo de exposição em que os organismos foram submetidos e os efeitos toxicológicos desencadeados pelas partículas plásticas no animal.

Todas as análises estatísticas foram conduzidas no software Microsoft Excel – 2016, as imagens foram geradas no Microsoft Power Point -2016 e o mapa foi confeccionado no Datawrappper.

3. RESULTADOS

Revisão sistemática

A busca dos artigos nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus*, *Scielo* e *Pubmed*, retornou ao todo 11.071 estudos. Após a remoção de artigos duplicados e triagem de acordo com os critérios de inclusão e de exclusão, 1.405 artigos foram selecionados para a leitura do texto completo. Após a leitura integral de cada artigo, 1.245 estudos foram excluídos por não apresentarem dados cruciais para a elaboração do banco de dados, restando 160 artigos que compuseram a revisão sistemática. Destes, 131 estudos foram classificados como observacionais e 29 como estudos experimentais (Figura S1).

Os estudos primários que compuseram o banco de dados datavam de 2001 a 2021, com uma tendência crescente no número de estudos ao longo dos anos (Figura 1a). Em relação aos

países em que os animais foram encontrados em campo ou avaliados experimentalmente, o Brasil (n = 27) foi o país que reportou o maior número de artigos, seguido por Estados Unidos (n = 15) e China (n = 15) (Figura 1b). Esses artigos foram publicados principalmente nos periódicos “Marine Pollution Bulletin” (n = 60), seguidos por “Environmental Pollution” (n = 18) “Science of the Total Environment” (n = 14) (Figura 1c).

Foi observado uma maior frequência de estudos observacionais (n = 131) em comparação aos experimentais (n = 29) (Figura 2a). Em ambos os tipos de estudo, a estratégia de captura dos animais foi por meio de arrasto (n = 23), coletas manuais (n = 19), captura de animais encalhados (n = 16), além de coletas com rede “Fyke” (n = 12) e pesca (n = 8) (Figura S2). Os estudos observacionais foram majoritariamente realizados em estuários (n = 53), costa marítima (n = 52) e praias (n = 29) (Figura 2 b). Os grupos de animais mais afetados foram moluscos (n = 64), peixes (n = 43) e crustáceos (n = 20) (Figura 2 c). Por outro lado, os estudos experimentais avaliaram os efeitos do plástico em animais cultivados em laboratório de origem marinha (n = 6) e estuarina (n = 5) (Figura 2d). Os organismos mais utilizados como modelo para ensaios ecotoxicológicos foram moluscos (n = 12), crustáceos (n = 9), peixes (n = 5) e poliquetas (n = 5) (Figura 2e).

Em relação aos efeitos observados nos animais, os estudos observacionais mostraram, em sua maioria, danos associados aos tecidos corporais (n = 65), seguido por lesões no sistema digestivo (n = 29) e intestino (n = 23) (Figura 3a). De maneira geral, os estudos relataram uma maior incidência de efeitos em animais adultos (n = 38) em comparação aos juvenis (n = 26) (Figura 3b). Dos estudos avaliados, 28 publicações reportaram resultados para machos, enquanto o número de resultados para fêmeas foi inferior (n = 10) (Figura 3c).

Os ensaios ecotoxicológicos foram realizados através de testes crônicos, superiores a 48 horas de exposição do organismo ao contaminante (n = 20), seguido por ensaios agudos, até 24 horas de exposição (n = 9) (Figura 4a). Nestes estudos, os animais utilizados estavam em fase adulta (n = 9), seguido por juvenis (n = 4) durante os experimentos (Figura 4b). Destes, em relação ao sexo do animal os dados não foram significativos, pois dois artigos descreveram o animal como fêmea e um artigo descreveu o animal como macho (Figura 4 c).

Nos experimentos as partículas plásticas foram encontradas associada aos tecidos epidermais (n = 8), intestino (n = 4) e sistema digestivo (n = 3) (Figura 4d). E os efeitos ecotoxicológicos foram observados em relação a diminuição nas taxas de ingestão (n = 6), crescimento (n = 3), além disso, também causaram danos neutrotóxicos (n = 3) nos animais (Figura 4e).

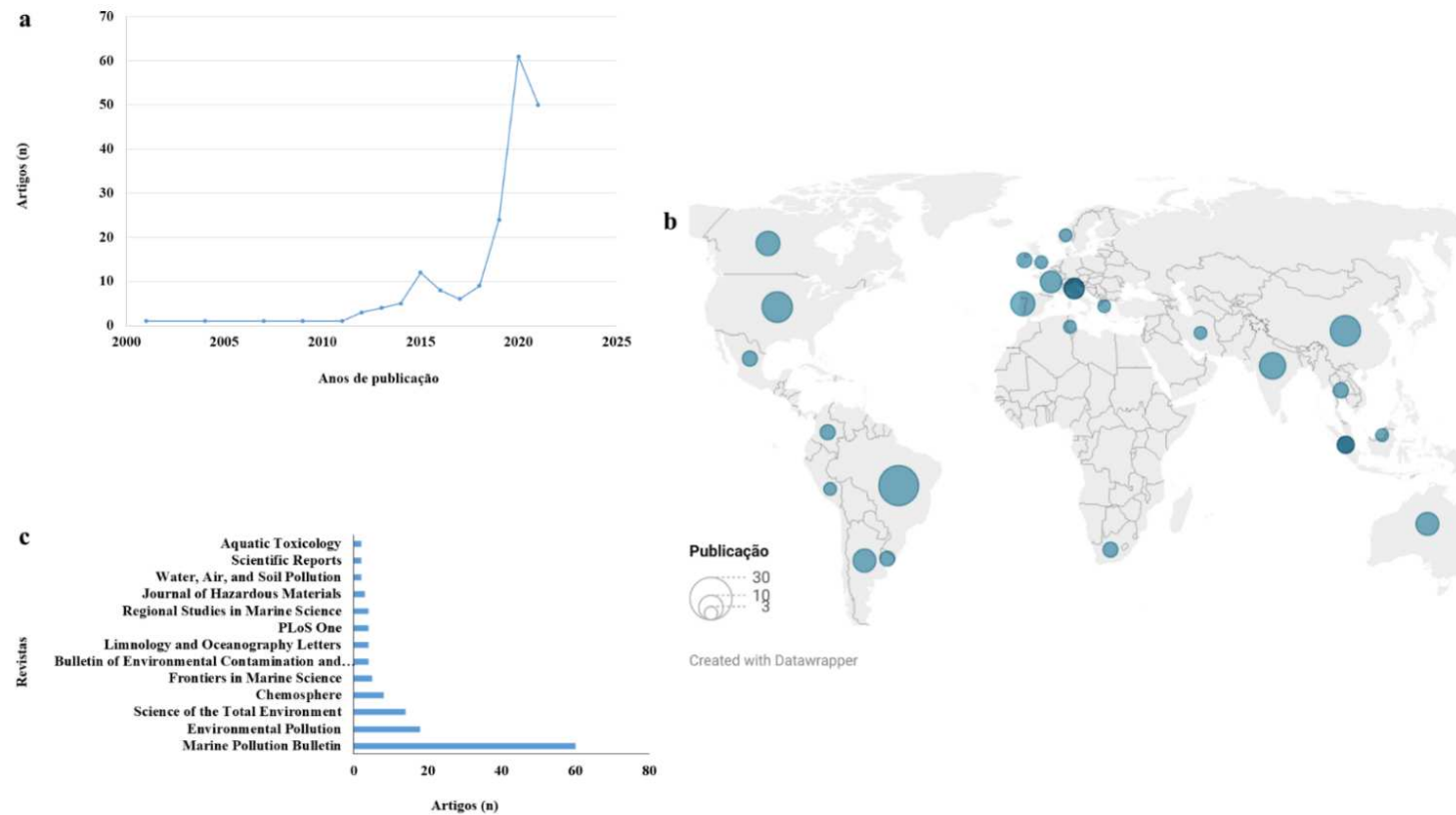
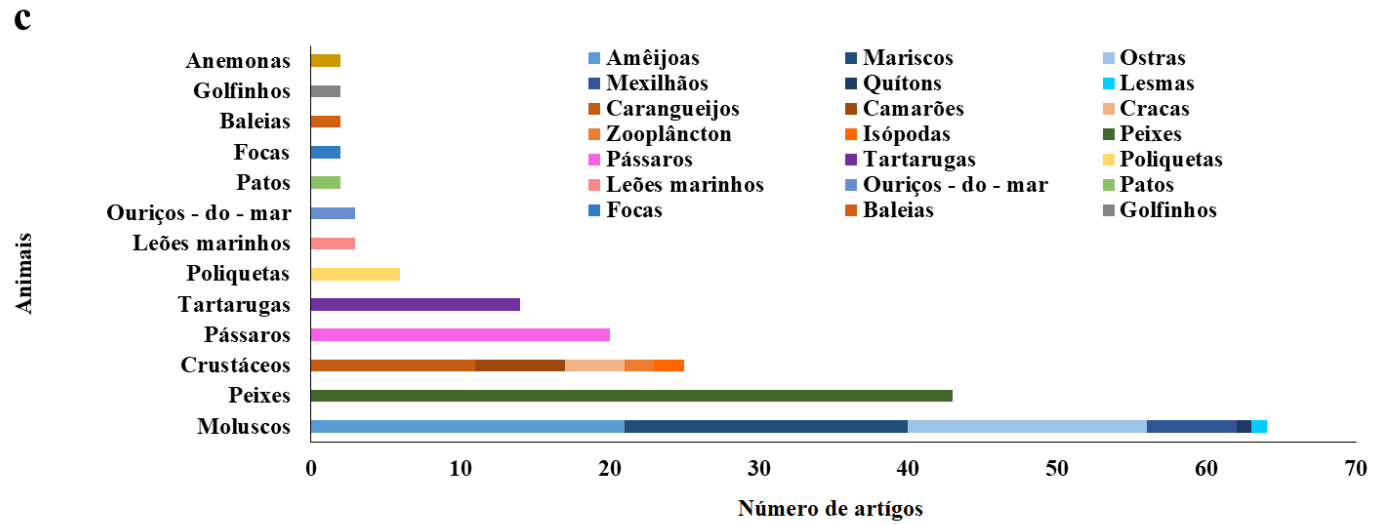
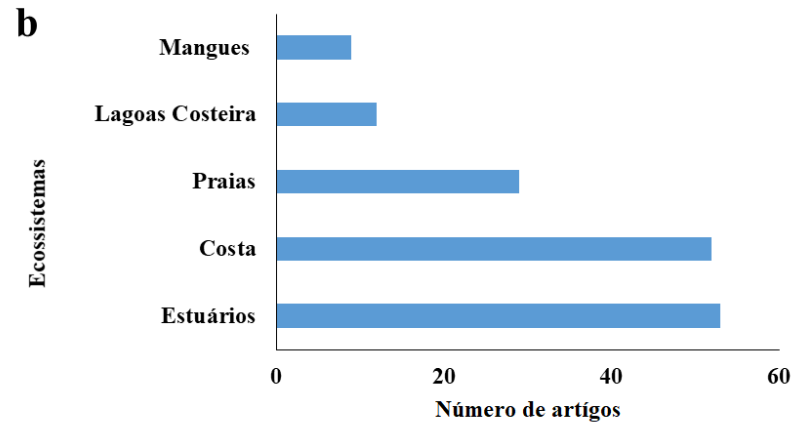
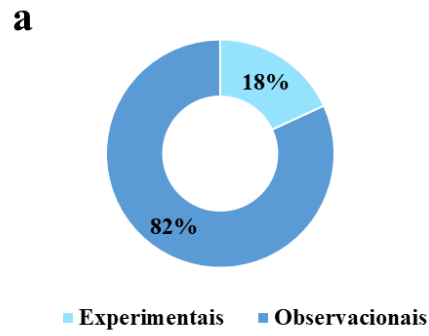


Figura 1: Dados científicos sobre as publicações relacionando efeitos toxicológicos desencadeados nos animais em decorrência da presença de plástico. (a) Tendência das publicações ao longo do tempo. De 2001 a 2010 o número de publicações foi inferior a 2 artigos; de 2012 a 2014 o número de publicações registradas foi de 3 a 5 artigos; de 2015 a 2020 o número de publicações variou de 14 a 61 artigos, e em 2021, o número de publicações foi de 50 artigos. (b) Mapa global relacionando o número de publicações por países. Esferas maiores representam os países que obtiveram até 30 publicações, esferas médias representam os países que obtiveram até 10 publicações e as esferas menores representam países que obtiveram até 3 publicações. (c) Revistas científicas com maior número de publicações sobre o tema, “Marine Pollution Bulletin” com 60 publicações, seguida por “Environmental Pollution” (18) e “Science of the Total Environment” (14). As demais revistas apresentaram menos de 10 publicações no período avaliado.



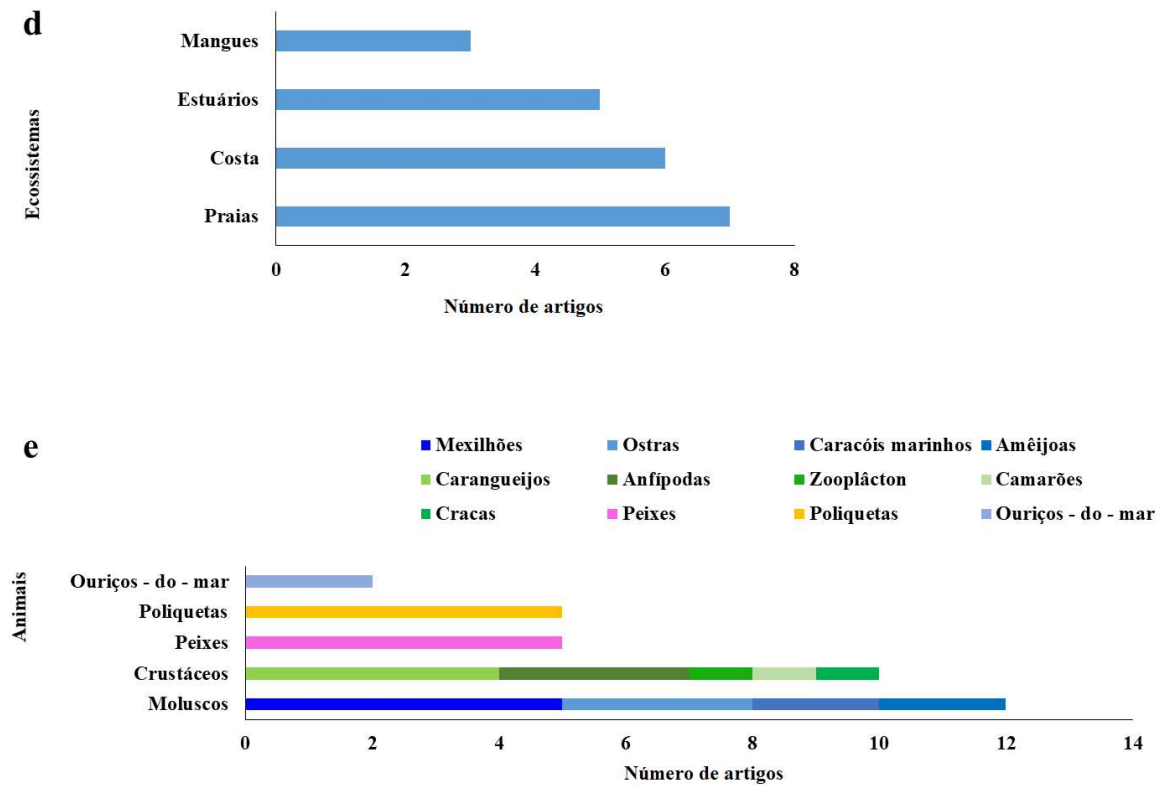


Figura 2: Relação dos artigos observacionais (b, c) e experimentais (d, e), ambientes em que foram realizados e os animais mais utilizados nos estudos. (a) Porcentagem de estudos observacionais 82% (131) e experimentais 18% (29). (b) Ecosistemas avaliados nos estudos observacionais: estuário (53), costa (52) praia (29), outros ambientes tiveram 3 e 2 publicações. (c) Animais avaliados em artigos observacionais: moluscos = 62 (amêijoas (21), mariscos (19), ostras (16), mexilhões (6), lesmas (1), peixes (43), crustáceos 25 (caranguejos (11), camarões (6), cracas (4), zooplâncton e isópodes com duas publicações cada; pássaros (20), tartarugas (14), poliquetas (6), leões marinhos e ouriços-do-mar com 3 publicações cada; aves (pato), focas, baleias, golfinhos e anêmonas tiveram 2 publicações cada. (d) Ecosistemas avaliados em estudos experimentais: praia (7), costa (6), estuário (5) e mangue (3). (e) Animais utilizados como modelos nos ensaios experimentais: Moluscos = 12 (mexilhões (5), ostras (3), caracóis marinhos e amêijoas (2)); Crustáceos = 10 (caranguejos (4), anfípodas (3), zooplâncton, camarões e cracas com 1 publicação), Peixes e Poliquetas (5), ouriços-do-mar (2).

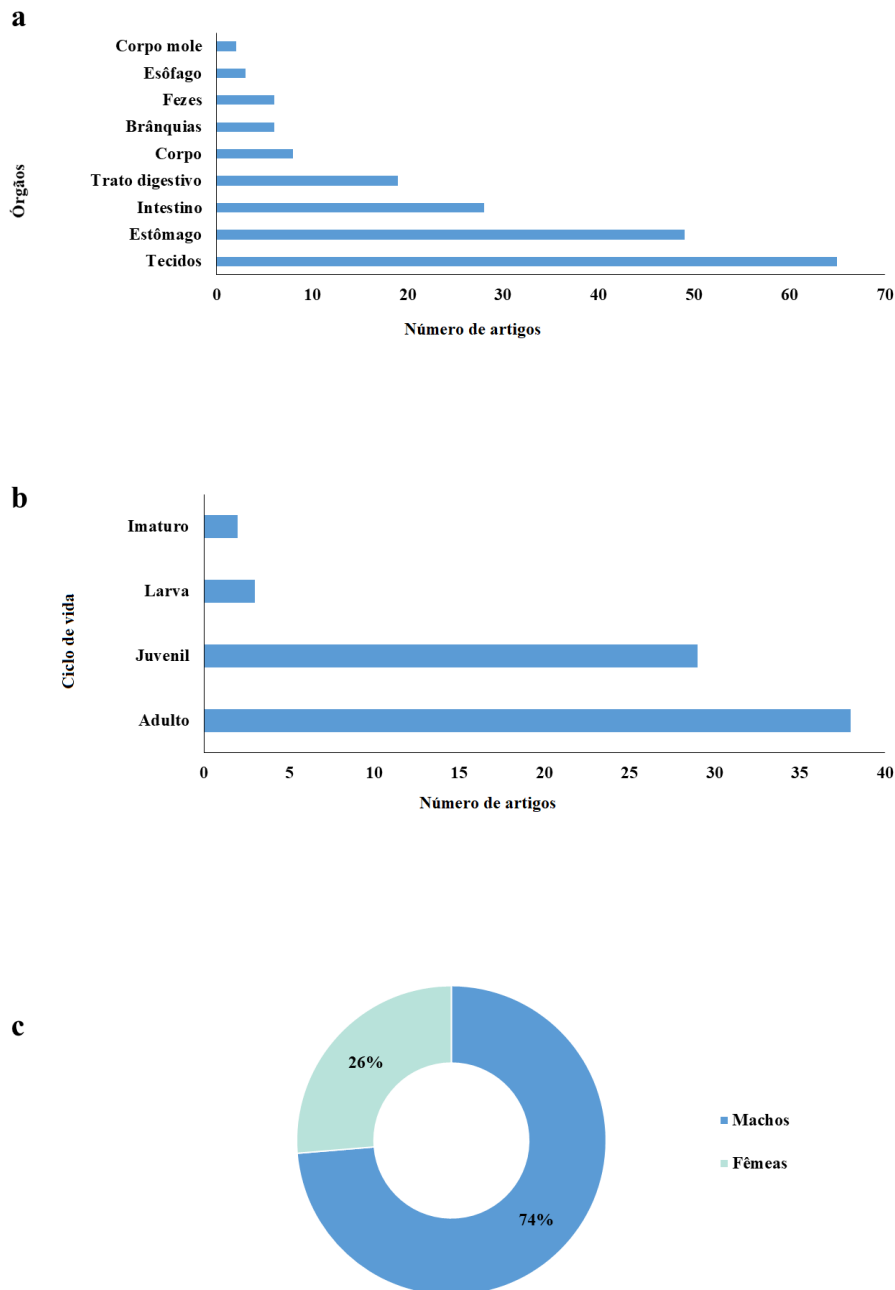


Figura 3: Relação dos animais inventariados em diferentes fases do ciclo de vida e os respectivos órgãos afetados pelos itens plásticos reportados nos estudos observacionais. (a) Órgãos, mais afetados por plásticos foram os tecidos (65), seguido por estômago (49) e intestino (28). Trato digestivo (19) e corpo (8). Os demais estudos tiveram menos de 7 publicações cada. (b) Maturidade, os animais mais vistos pelos estudos eram adultos (38), seguido por juvenil (29), os demais obtiveram menos de 5 publicações cada. (c) Porcentagem em relação ao sexo do indivíduo, 74 % machos (28) e 26 % fêmeas (10).

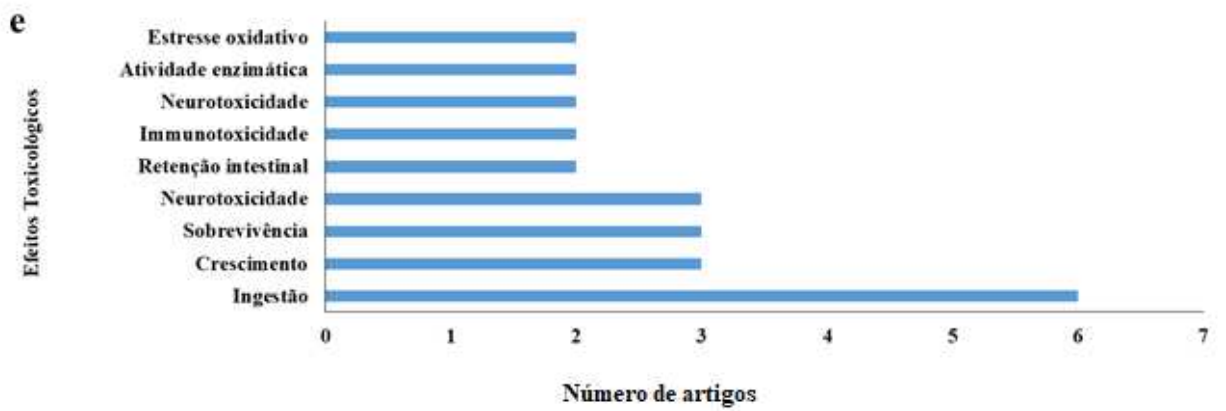
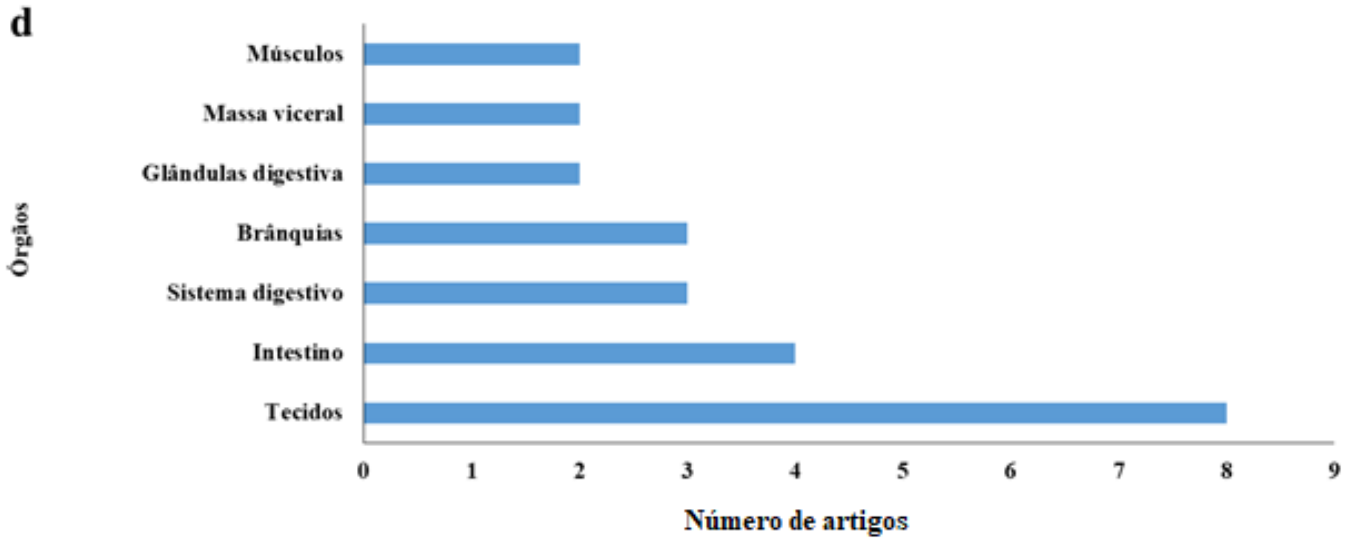
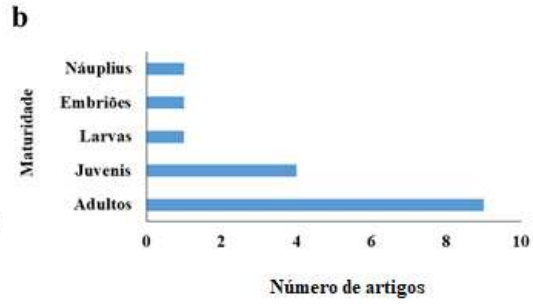
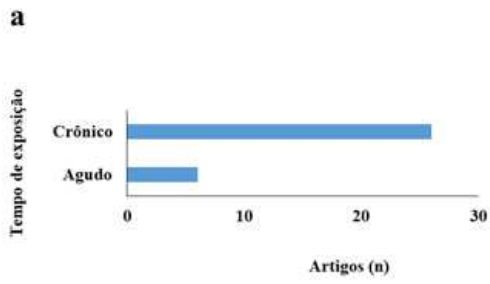


Figura 4: Relação de animais inventariados em diferentes fases do ciclo de vida e os efeitos causados pelos itens plásticos reportados em estudos experimentais. (a) Tempo de exposição dos tratamentos nos experimentos, crônico, acima de 48 horas (26) e agudo, de nove a 24 horas (6). (b) Estágio de maturidade dos organismos usados em ensaios experimentais, adultos (9), juvenis (4), larvas, embriões e náuplios com 1 publicação cada. (c) Porcentagem do sexo dos animais utilizados, fêmeas = 67% (2), machos = 33% (1). (d) Órgãos com maior número de plásticos encontrados, tecidos (8), intestino (4), sistema digestivo e brânquias com 3 publicações cada, os demais órgãos com 2 publicações cada. (e) Efeitos toxicológicos observados nos animais em experimento, ingestão (6), crescimento, sobrevivência e neurotoxicidade com 3 publicações cada, os demais registraram 2 publicações cada.

Os efeitos observados nos organismos após o tempo de exposição incluíram dificuldade de locomoção, diminuição na taxa de crescimento corporal e nas taxas reprodutivas, como a postura de ovos (Tabela 1). Além disso, também foram identificados efeitos neurotóxicos, imunológicos, morfológicos e comportamentais (Tabela 1).

Tabela 1: Efeitos toxicológicos desencadeados nos animais utilizados nos ensaios experimentais.

Espécies	Grupos zoológicos	Efeitos Desencadeados	Referências
<i>Nassarius pullus</i>	Molusco	Redução na velocidade e na busca por presa	Aloy et al., 2011
<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Molusco	Microplásticos como vetores de pesticida acarretando na bioacumulação de PFASs, PFOA, PFOS, PFDA e PFPeA	Álvarez-Ruiz et al., 2021
<i>Menidia beryllina and Favella spp.</i>	Peixe e Protozoa	Diminuição no crescimento e na interação presa predador	Athey et al., 2020
<i>Crassostrea giga</i>	Molusco	Exposição ao microplástico aumentou a abertura na valva em microfchaduras, diminuição da abertura da válvula e crescimento da concha. Os microplásticos com herbicida clorotoluron aumentaram a abertura das válvulas e diminuíram os	Bringer et al., 2021

		microfechamentos das válvulas e o crescimento da concha	
<i>Mytilus edulis</i>	Molusco	Acumulação de microfibras nas glândulas digestivas e no estômago de moluscos	Christoforou et al., 2020
<i>Pomatoschistus microps</i>	Peixe	Os microplásticos influenciaram na seleção das presas. Redução da alimentação e redução nas respostas individuais e na população	de Sá et al., 2015
<i>Meretrix lyrata</i>	Molusco	A taxa de microplásticos em <i>M. lyrata</i> diminuiu ao longo do tempo, eliminando microplásticos do seu sistema	Hamid et al., 2020
<i>Emerita analoga</i>	Crustáceo	A fibra de polipropileno aumentou a mortalidade em adultos e diminuiu a retenção de massas de ovos	Horn et al., 2019
<i>Lytechinus variegatus</i> / <i>Nitocra</i> sp.	Ouriço - do - mar / Crustáceo	Altas densidades de microplásticos induziram toxicidade, mas em densidades ambientais não produziram toxicidade	Izar et al., 2019
<i>Enoplolaimus</i> spp.	Nematóide	Impacto na taxa de ingestão	Kang et al., 2021
<i>Isognomon alatus</i>	Molusco	Os nanoplásticos inibiram a indução de sod1 e cox1. Indução à resposta ao estresse oxidativo e à endocitose	Labordais et al., 2021

<i>Pomatoschistus microps</i>	Peixe	Os microplásticos associados com Cr(VI) causaram efeitos negativos no desempenho predatório	Luís et al., 2015
<i>Litopenaeus vannamei</i>	Crustáceo	Nível elevado de peroxidação lipídica e aumento moderado nos níveis de antioxidantes enzimáticos	Maharana et al., 2020
<i>Hediste diversicolor</i>	Poliqueta	Redução da sobrevivência e no crescimento, afetou a neurotransmissão e a produção de antioxidantes	Missawi et al., 2021
<i>Paracentrotus lividus</i>	Ouriço-do-mar	A interação entre nanoplásticos modelares e nanopartículas de poliestireno modificadas com carboxila causou uma diminuição significativa na estabilidade da membrana lisossomal e na capacidade fagocítica, além de uma redução significativa na viabilidade celular, estabilidade da membrana lisossomal e fagocitose	Murano et al., 2021
<i>Hediste diversicolor</i>	Poliqueta	O impacto imunotóxico da exposição a microplásticos induziu uma diminuição na viabilidade dos coelomócitos	Revel et al., 2018
<i>Mytilus coruscus</i>	Molusco	O impacto negativo dos microplásticos no metabolismo energético a nível celular	Shang et al., 2021
<i>Hediste diversicolor</i>	Poliqueta	O impacto negativo dos microplástico no metabolismo energético a nível celular	Silva et al., 2020 (a)

<i>Hediste diversicolor</i>	Poliqueta	O impacto das nanopartículas no metabolismo, na colinesterase e no comportamento de escavação. Alterações comportamentais afetam o ciclo de nutrientes	Silva et al., 2020 (b)
<i>Crassostrea gigas</i>	Molusco	Os microplásticos causaram alterações na atividade das enzimas metabólicas e acarretaram danos histológicos. Além disso, foram detectados nas brânquias e na glândula digestiva, e inibiram o metabolismo lipídico. As atividades enzimáticas foram ativadas	Teng et al., 2021
<i>Donax trunculus</i>	Molusco	A mistura de microplásticos (PP/PE) induziu a inibição da atividade da acetilcolinesterase tanto nas brânquias quanto na glândula digestiva, além de causar estresse oxidativo	Tlili et al., 2021
<i>Rhithropanopeus harrisi</i>	Crustáceo	A ingestão de microplásticos induziu a diminuição de peso	Torn., 2020
<i>Platorchestia smithi</i>	Crustáceo	O impacto dos microplásticos na ingestão afeta a sobrevivência e o comportamento de busca de abrigo	Tosseto et al., 2016
<i>Talitrus saltator</i>	Crustáceo	As pulgas-de-areia são capazes de ingerir microesferas misturadas com alimentos	Ugolini et al., 2013
<i>Mytilus edulis / Arenicola marina</i>	Molusco / Poliqueta	Em geral, a exposição a microesferas de poliestireno não causou alterações significativas na alocação de energia celular. No entanto, na glândula digestiva de moluscos expostos a microplásticos, houve um aumento de 25% no consumo de energia	Cauwenberghe et al., 2015
<i>Mytilus coruscus</i>	Molusco	Os efeitos combinados de microplásticos e acidificação dos oceanos afetam ligeiramente as respostas oxidativas, mas inibiram significativamente as enzimas digestivas em moluscos	Wang et al., 2020

<i>Fistulobalanus albicostatu</i> / <i>Tetraclita japonica formosana</i> / <i>Chthamalus dalli</i> / <i>Balanus glandula</i>	Crustáceo	O tempo de retenção dos microplásticos no trato digestivo das larvas naupliárias aumentou significativamente com a diminuição do tamanho das esferas de microplástico	Yu et al., 202
---	-----------	---	----------------

Nos estudos observacionais, a origem dos itens plásticos encontrados nos animais esteve associada à degradação de itens de pesca (n = 17), sacolas plásticas de uso único (n = 10) e garrafas (n = 3) (Figura 5a). Os polímeros mais relatados foram polietileno (n = 35) e polipropileno (n = 16) (Figura 5b), geralmente sob a forma de fibras (n = 74) e fragmentos (n = 31) (Figura 5c). As partículas foram encontradas em sua maioria na faixa de tamanho que compreende os microplásticos (n = 110) (Figura 5d) e apresentavam as cores azul (n = 40), branca (n = 20) e transparente (n = 17) (Figura 5e).

Nos estudos experimentais, a origem dos itens plásticos não resultou em dados robustos, com apenas 4 estudos fornecendo essa informação. As partículas empregadas nesses estudos se originaram-se de esmaltes (n = 1), maquiagem (n = 1), sacola plástica (n = 1) e corda (n = 1) (Figura S2b). As análises poliméricas indicaram uma predominância de polietileno (n = 18), seguido por poliestireno (n = 9) e polipropileno (n = 5) (Figura 6a). Essas partículas foram classificadas como microplástico (84%; n = 21) e nanoplástico (16%; n = 4) (Figura 6b), nos formatos de esferas (n = 8) e fibras (n = 4) (Figura 6c), sendo verde a cor predominante (n = 3) (Figura 6d).

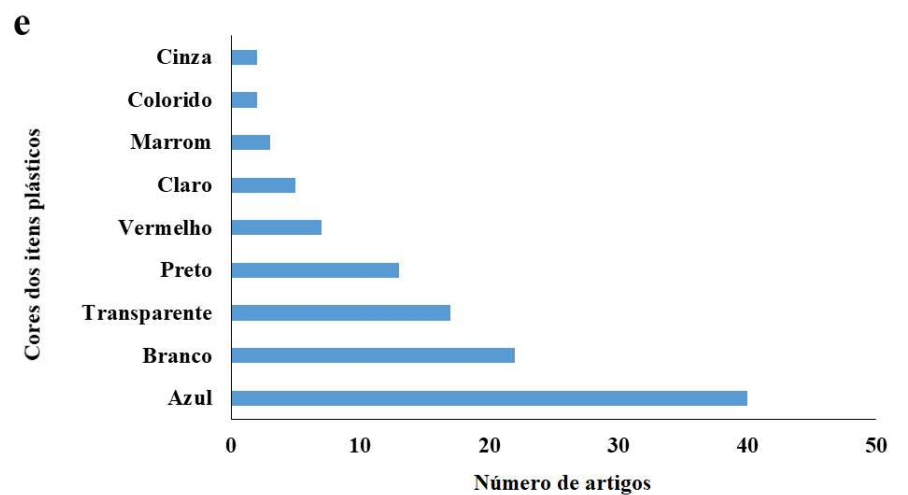
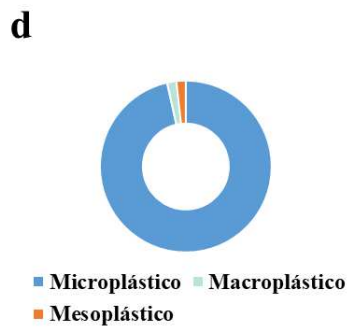
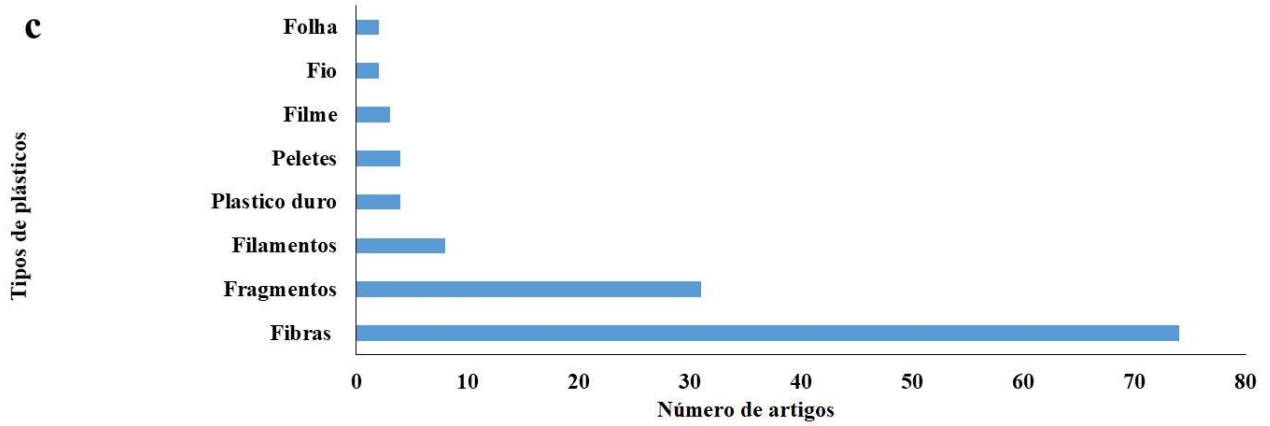
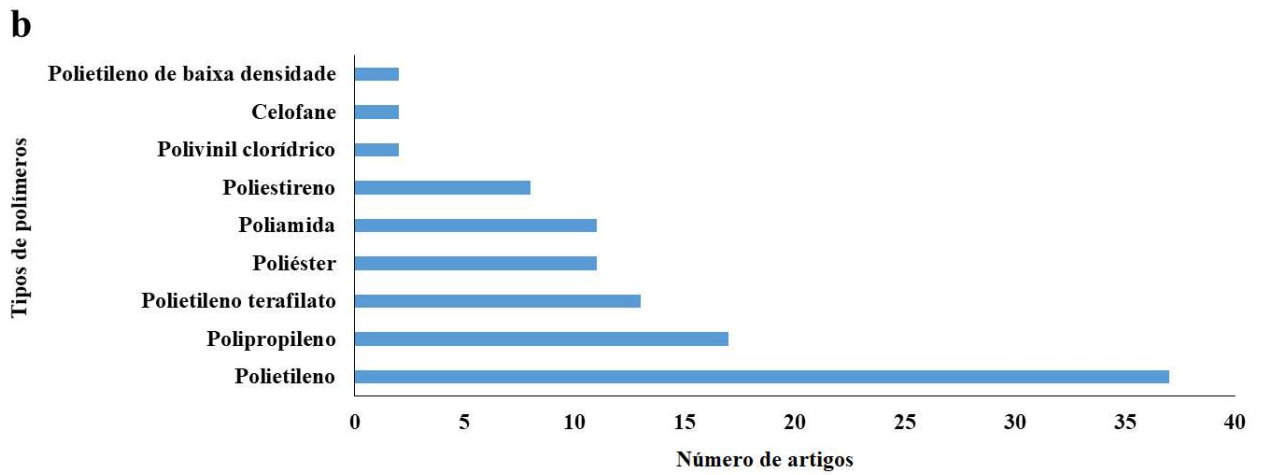
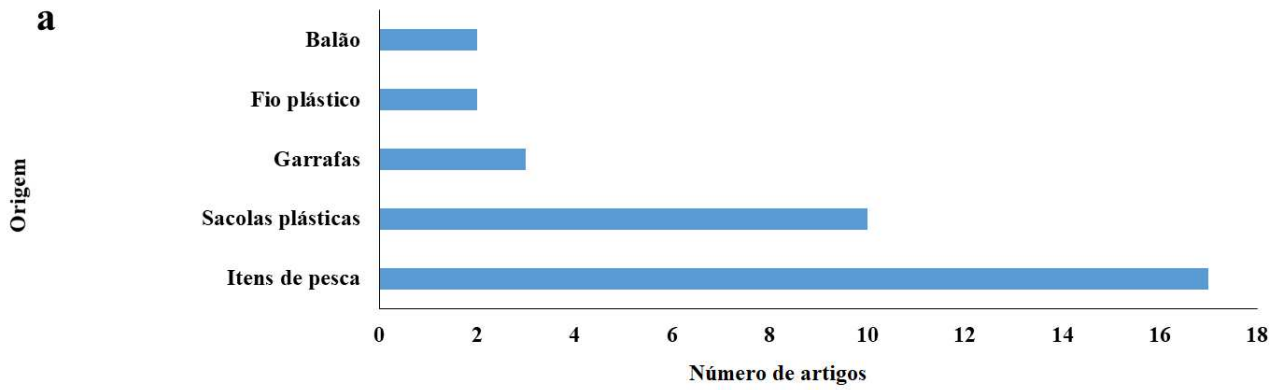


Figura 5: Dados sobre os itens plásticos observados em estudos observacionais. (a) Origem das partículas plásticas, itens de pesca (17), sacolas plásticas (10), garrafas (3), os demais apresentaram 2 publicações cada. (b) Tipos de polímeros, polietileno (37) polipropileno (17), polietileno tereftalato (13), poliéster e poliamida (11), os demais tiveram 2 publicações cada. (c) Tipologia, fibras (74), fragmentos (31) e filamentos (8), os demais tiveram menos de 5 publicações. (d) Porcentagem dos tamanhos plásticos encontrados, microplástico = 96% (110), macroplástico e mesoplástico com 2% cada (2). (e) Cores das partículas plásticas, azul (40) branco (22) transparente (17) e preto (13), os demais obtiveram menos de 7 publicações.

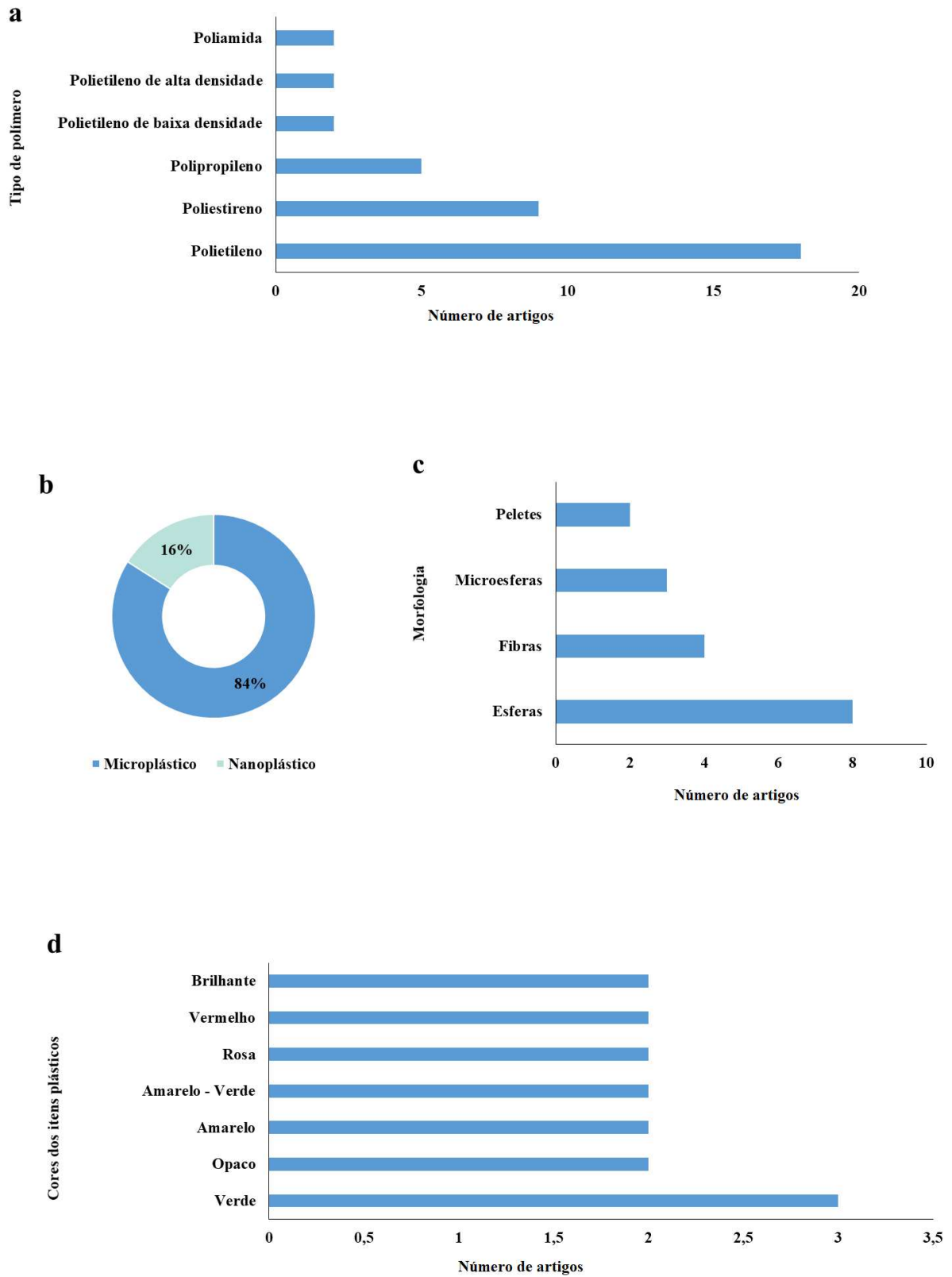


Figura 6: Dados sobre os itens plásticos observados em estudos experimentais. (a) Tipos de polímeros encontrados nos artigos experimentais, polietileno (18), poliestireno (9), polipropileno (5), os demais polímeros possuem 2 publicações cada. (b) Porcentagem do tamanho das partículas encontradas nos estudos, microplástico

= 84% (21), nanoplástico -16% (n 4). (c) Tipos morfologia encontrados nos estudos, esferas (8), fibras (4), microsferas (3) e pellets (2). Tipos de polímeros encontrados nos artigos experimentais, polietileno (18), poliestireno (9), polipropileno (5), os demais polímeros possuem 2 publicações cada. (d) Cores das partículas plásticas encontradas em artigos experimentais, verde (3), e demais cores com 2 publicações cada.

Além disso, reunimos informações sobre as médias de quantidade, peso e tamanho dos animais utilizados nos estudos, assim como a quantidade de itens plásticos encontrada no interior de cada indivíduo. No entanto, não houve dados suficientes para considerarmos e avaliarmos a relevância e significância dessas alterações (Tabela 2).

Tabela 2: Quantidade de plástico encontrada ou associada aos animais reportados nos estudos. NA = dados que não foram analisados. * Os dados foram obtidos de uma publicação: (a) de Sá et al. 2015; (b) Maharana et al. 2020; (c) Murano et a. 2021; (d) Kang et al.2021; (e) Hamzah et al.2021; (f) Barbosa et al. 2020; (g) Nakao et al. 2020.

Grupo	Tamanho corporal médio (cm)	Peso Corporal Médio (g)	Quantidade média de animais usados	Quantidade média de plástico encontrada nos animais (itens/animais)	Quantidade média de plástico associada aos animais (itens/animais)
Experimentais					
Molusco	4,43	8,54	20,2	NA	248
Peixe	1,75	NA	28,7	NA	31,5* (a)
Crustáceo	2,03	1,3* (b)	24,3	NA	NA
Poliqueta	NA	0,36	24,4	NA	NA
Ouriço-do-mar	NA	NA	50* (c)	NA	NA
Nematóide	NA	NA	67,6* (d)	NA	6,43
Observacionais					
Molusco	5,66	18,22	144,19	70,65	18,5

Peixe	814,5	185,82	26,68	13,44	3,19
Crustáceo	8	31,29	80,3	23,4	34,41
Poliqueta	0,28* (e)	NA	172,8	42	NA
Ouriço-do-mar	2,46	NA	15,66	9	626,84* (f)
Pássaro	127,7	1566,5	32,19	9	1,42
Tartaruga	54,48	24,32	222,22	48,43	26,8
Leão marino	NA	NA	31	NA	NA
Pato	4,10* (g)	1122,5	37,25	3,5	2,27
Foca	NA	NA	NA	NA	NA
Baleia	NA	NA	NA	NA	NA
Golfinho	NA	NA	4,5	4,5	NA
Anemona	NA	2,84	70	NA	108,65

4. DISCUSSÃO

Esta revisão sistemática buscou sintetizar os estudos mais recentes sobre os efeitos da contaminação por plásticos em animais das regiões costeiras, adotando uma abordagem global. Os resultados revelaram que o Brasil foi a nação com maior número de artigos abordando poluição plástica em animais coletados em campo. Esse achado é corroborado pelo estudo de Deus et al. (2024), que identificou 354 áreas investigadas no Brasil, dentro de um total de 66 publicações. Em relação à temporalidade dos estudos realizados no Brasil, o nosso estudo destacou que as publicações se iniciaram em 2001, um padrão também observado por (Azevedo-Santos et al., 2021), que identificou um aumento exponencial nas publicações a partir de 2000 até 2021. Esse aumento nas publicações pode estar relacionado tanto à crescente

relevância do tema quanto à extensa faixa litorânea do país (Brinkhoff, 2022). Estes dados ressaltam a crescente preocupação e esforço de pesquisa no Brasil em relação à poluição plástica e seus impactos na fauna marinha.

Além do Brasil, os Estados Unidos e a China se destacaram como países que apresentaram um número significativo de publicações sobre a interação entre os animais e a poluição plástica. Esse interesse pode ser associado ao fato de que esses países, assim como o Brasil, estão entre os dez maiores produtores de petróleo no mundo (Enerdata, 2023). Além disso, segundo um estudo realizado pela agência não governamental *World Wide Fund for Nature* (WWF), intitulado “Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização” (WWF, 2019), revelou que os Estados Unidos, China, Índia e Brasil estão na lista dos países que mais produzem lixo no mundo e que enfrentam problemas relacionados à gestão de resíduos, especialmente de plástico.

Nosso estudo identificou que os principais locais de acúmulo de poluição plástica são estuários, costa marítima e praias. Esses ambientes estão, na atualidade, muito suscetíveis às ações antropogênicas, devido ao intenso turismo e urbanização ao seu redor e também a causas naturais onde hidrologia e geografia do ambiente interfere na distribuição das partículas plásticas em decorrência dos movimentos das correntezas (Savenije, 2012; Thushari e Senevirathna, 2020; Van Emmerik et al., 2022). Estudos de inventário sobre a ocorrência de plástico em ambientes marinhos têm observado sua presença principalmente na superfície do mar, na areia das praias e nos sedimentos profundos dos mares, alcançando até mesmo o Ártico (Barnes et al., 2009; Obbard et al., 2014). Esses resíduos plásticos representam uma ameaça significativa para a biodiversidade marinha em diversos níveis tróficos da cadeia alimentar, uma vez que podem ser transferidos através da bioacumulação (Seltenrich, 2015).

Nosso estudo revelou que a maior parte do plástico encontrado nos animais estava sob a forma de fibras e fragmentos. Essas morfologias são produtos da degradação de itens maiores, como peças de plástico, redes monofilamentares, cordas e tecidos sintéticos, sendo classificados como microplásticos (Susanti, Mardiasuti e Wardiatno, 2020). Estudos anteriores de Kor & Mehdinia (2020) e Ouyang et al (2022) também identificaram as fibras e fragmentos como as morfologias mais avistadas na superfície do Golfo Pérsico e em animais de zonas úmidas, respectivamente. Ainda, Hitchcock & Mitrovic (2019) observaram que, em estuários urbanos, há um efeito de gradiente urbano que leva a um aumento na quantidade dessas partículas plásticas (fragmentos e fibras) no ambiente.

Em nosso estudo, observamos que a origem das partículas plásticas está predominantemente associada à degradação de itens de pesca e sacolas de uso único, além de

itens cosméticos como esmaltes e maquiagem. Esses resultados corroboram os estudos realizados por Consoli et al (2019) e Scutteri et al (2023) que identificaram uma predominância de plásticos derivados de itens de pesca, embalagens e produtos de uso único, como sacolas, entre os resíduos marinhos observados.

Além da origem das partículas plásticas, coletamos dados sobre as cores. Nossos resultados demonstraram que as cores azul, branca e transparente foram as mais frequentes nos organismos coletados em campo, enquanto a cor verde foi predominante nos estudos experimentais. Essas cores refletem o processo de degradação dos itens no ambiente, em que as cores mais claras são observadas para fragmentos rígidos e as cores azul e verde estão relacionadas fibras de pesca (Martí et al., 2020). Os resultados de Santos et al (2016) observou que as cores claras são as mais consumidas por espécies que interagem com o ambiente aquático, confundindo as mesmas com suas presas naturais.

De maneira geral, nossos dados mostram que os itens plásticos eram compostos principalmente por polietileno, polipropileno e poliestireno. Isso é justificável, uma vez que esses polímeros estão presentes na composição de sacolas de uso único, embalagens, garrafas de água e itens hospitalares (Bond et al., 2018). Resultados semelhantes também foram apontados por Palmer & Herat (2021) e Erni-Cassola et al (2019), que observaram uma predominância de polietileno e polipropileno nas superfícies dos mares. A abundância desses polímeros pode ser atribuída à sua baixa densidade, o que facilita a sua presença na superfície dos ambientes aquáticos (Fazey & Ryan, 2016)

Neste trabalho, observamos que o grupo de animais mais sensível à poluição plástica foram os moluscos, que apresentaram uma média de 248 itens plásticos por indivíduo. Nesse grupo, a fonte primária de absorção é a alimentação, que é feita através da filtração, como consequência dessa absorção, as partículas plásticas são encontradas retilas nas glândulas digestivas e nas brânquias (Green et al., 2019). Além disso, também são observados a ingestão através das microvilosidades da superfície corporal ou por endocitose (Pedersen et al., 2020). E também através das células epiteliais (Sacanes et al., 2019). Essa ingestão acarreta principalmente em danos relacionados à diminuição da velocidade de locomoção e da eficiência na busca por alimento, redução das válvulas presentes nas conchas e do metabolismo enzimático, além de inibição das enzimas digestivas e impactos nas respostas oxidativas. Resultados similares foram observados por Dovzhenko et al (2020) no qual bivalves expostos a partículas plásticas sofreram danos nas glândulas digestivas e produção da glutathiona (GSH). Além disso, foram registrados danos na hemolinfa, guelras, glândulas digestivas e no lúmem intestinal, bem como danos imunológicos e alterações na estrutura do DNA (Avio et al., 2015).

Além dos moluscos, também observamos efeitos negativos da poluição plástica em peixes, que apresentaram uma diminuição no crescimento, menor taxa de predação e menor taxa alimentar em decorrência da presença de plástico. Esses dados corroboram a literatura existente, que aponta que os efeitos adversos nos peixes devido a interação com plástico resultam do acúmulo das partículas no sistema digestivo, tecidos, brânquias e cérebro (Ding et al., 2020; Zitouni et al., 2021). Em decorrência do acúmulo das partículas nos órgãos, os efeitos desencadeados estão relacionados principalmente às mudanças comportamentais, impactos no desenvolvimento, fertilidade, estresse oxidativo e expressão gênica, como observado por Hodkovicova et al (2022).

Em nosso estudo, também observamos que em crustáceos os efeitos toxicológicos baseavam-se no aumento das taxas de retenção de microplástico no intestino de larvas náupliares de cracas, aumento da mortalidade em adultos, diminuição na taxa de retenção da ninhada de ovos, aumento na peroxidação de lipídios e aumento moderado nos níveis de antioxidantes. Essas partículas entram em contato com esses animais através da alimentação, em um estudo realizado por Hämer et al. 2014 relataram que os isópodes não conseguiram distinguir o que era o alimento natural e as partículas plásticas. Além disso, são observados em algumas espécies de camarão o processo de regurgitação dessas partículas, um comportamento natural desses organismos para a remoção de partículas grandes e indigestas contidas no estômago (Saborowski et al., 2019). Essa ingestão de partículas plásticas pode levar a diminuição nas taxas e alimentação, impacto no metabolismo de lipídios e nas enzimas digestivas lipídicas (Chen, Lee e Walther, 2020; Griffith et al., 2023). Além disso, foram observados danos à reprodução (Alimba e Faggio, 2019).

Diante do exposto, verifica-se que os plásticos afetam os diversos níveis tróficos, incluindo consumidores primários e secundários (moluscos, crustáceos e peixes) do ecossistema marinho. A presença de plásticos no ambiente representa uma ameaça para os animais tanto por transferência vertical, quando o animal ingere diretamente a partícula, quanto por transferência horizontal, através da cadeia trófica. Nessa última forma, a presa, contendo partículas plásticas em sua superfície ou no interior do corpo, transfere esses resíduos para o predador (Tuuri e Leterme, 2023). Este tipo de transferência trófica foi observado, por exemplo, de mexilhões para caranguejos (Farrell e Nelson, 2013) e de peixes para focas (Nelms et al., 2018).

5. CONCLUSÃO

Esta revisão sistemática trouxe um panorama global sobre a relação entre a poluição plástica e seus efeitos na biota aquática de zonas costeiras. Identificou-se que o Brasil lidera em termos de estudos sobre o tema nas últimas duas décadas, seguido pelos Estados Unidos e China. As áreas mais afetadas foram os estuários, praias e a costa.

A respeito dos itens plásticos mais encontrados, observou-se que os microplásticos foram o tamanho mais encontrado, em sua maioria sob a forma de fragmentos originados principalmente de plásticos de uso único, como as sacolas plásticas. As cores mais frequentes foram branca, transparente, azul e verde, e os principais polímeros identificados foram polietileno e polipropileno. Os animais mais afetados foram moluscos, peixes e crustáceos marinhos, nos quais observou-se principalmente efeitos nos tecidos e no sistema digestivo. Nos estudos experimentais, houve uma preferência no uso de moluscos, crustáceos e peixes como modelos para os ensaios ecotoxicológicos. Nesses indivíduos, os efeitos foram majoritariamente observados nas taxas de ingestão, crescimento e reprodução.

Em resposta à crescente problemática da poluição plástica, iniciativas governamentais e empresariais têm banido plásticos de uso único e ampliado suas ações para incluir itens como isopor e microesferas (Knoblauch e Mederake, 2021). No entanto, apesar dessas medidas, o uso de plásticos continua a ser amplamente difundido devido ao seu baixo custo e versatilidade. Portanto, são necessários maiores esforços, tanto de instituições quanto de regulamentações governamentais, para reduzir a velocidade e os impactos do acúmulo e da poluição plástica nos ambientes aquáticos globalmente.

Apêndice A - Material Suplementar

Figura S1 – Diagrama PRISMA com as triagens realizadas na revisão sistemática.

Figura S2 - Métodos de capturas de animais em campo e para laboratório e origem dos plásticos em artigos experimentais.

CAPÍTULO 2
EFEITOS TOXICOLÓGICOS DE MICROPLÁSTICOS EM *Ceriodaphnia silvestrii*
Daday 1902

Capítulo a ser submetido a revista Aquatic Toxicology A1 – FI: 4.1 “Toxicological effects of glitter on Ceriodaphnia species”

Thaiane Cantarino Costa^{1,2}; Thaís Pereira de Jesus¹; Vitória Cristina Popermayer de Mattos¹; Simone Jaqueline Cardoso^{1,2*}

¹ Laboratory of Plankton Ecology– LABEP, Department of Zoology, Federal University of Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora, MG, 36036-900, Brazil

² Postgraduate Program in Biodiversity and Nature Conservation, Institute of Biology, Federal University of Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora, MG, 36036-900, Brazil

RESUMO

A poluição plástica em ambientes aquáticos é uma preocupação global, especialmente em ecossistemas de água doce, onde a contaminação é causada através de tratamento de águas residuais, descartes industriais e têxteis. Isso resulta na liberação de micropartículas plásticas em rios, lagos e nos sedimentos aquáticos. Os microplásticos primários são fabricados pela indústria, para compor diferentes produtos de uso humano dentre eles está o glitter que é um produto confeccionado por micropartículas de polietileno teraftalato coberto por uma camada fina de alumínio para conferir brilho a partícula. Esse material é muito utilizado em produtos cosméticos como maquiagem e esmaltes, além de estarem presentes em brinquedos, tintas e produtos artísticos de forma geral. No entanto, o glitter, que possui características semelhantes aos demais microplásticos, não é classificado como microplástico primário, criando uma lacuna na compreensão dos efeitos toxicológicos causados ao meio ambiente e aos organismos. Com isso, o objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos ecotoxicológicos de microplásticos sobre espécies nativas de microcrustáceos de água doce. Como modelo de estudo foi utilizado microcrustáceo filtrador de água doce *Ceriodaphnia silvestrii*, espécie nativa brasileira. Para realização dos experimentos mantivemos as cepas de *C. silvestrii* em cultivos com fotoperíodo ajustado de 12:12 horas (claro/escuro) a 25 °C, alimentadas com alga verde *Raphidocelis subcapitata*. Além disso, foram realizados os testes de sensibilidade com diferentes concentrações de cloreto de potássio (KCl) para observar a sensibilidade das populações de *C.*

silvestrii e construir uma curva de dose resposta. Para os experimentos, optamos por testar a toxicidade aguda (24 e 48 horas) das partículas de glitter. Nós partimos de uma concentração ambiental já conhecida de $2,7 \times 10^7$ partículas/L, na qual modificamos para obter os valores em mg/L. Com isso, obtivemos três tratamentos: 0 (controle), 1.22 (T1) 12.2 (T2) e 122 (T3) mg de glitter por litro de água mineral. Todos os tratamentos, incluindo o grupo controle, continham volume final de 50 mL de água mineral e foram realizados em triplicata, contendo 5 indivíduos neonatos em cada unidade amostral. A taxa de mortalidade foi acessada através da contagem do número de indivíduos mortos (*i.e.*, sem mobilidade após 10 segundos de observação) por unidade amostral. Ao final do experimento, todos os organismos utilizados nos tratamentos foram analisados em Microscópio de Contraste Interferencial para a observação dos efeitos causados pelo glitter. Após a exposição ao glitter, obtivemos um LC₅₀ (a concentração de letalidade em 50% da população dos organismos teste) de 2,15 mg/L em 24 horas e 1,23 mg/L em 48 horas. Constatou-se que a concentração mais elevada, 122 mg/L, foi a mais significativa, causando 100 % de mortalidade dos organismos nas primeiras 24h. Em todos os experimentos realizados, as taxas de mortalidade aumentaram com concentrações mais elevadas de glitter em comparação ao controle (ANOVA, $p < 0,05$). Além disso, houve diferença significativa entre os tratamentos controle, T2 e T3 (Kruskallwallis, $p < 0,05$). Por fim, foram observados danos morfológicos que causaram a imobilização dos organismos *C. silvestrii*, como aderências das partículas de glitter aos apêndices e remoção de partes dos animais. Esses resultados evidenciam que o glitter apresenta toxicidade para microrganismos aquáticos com potenciais implicações para as teias tróficas aquáticas.

Palavras-chave: Ecotoxicologia; toxicologia ambiental; glitter; poluição plástica;

1. INTRODUÇÃO

Desde sua criação, os produtos plásticos trouxeram benefícios à sociedade, mas também geraram uma crescente dependência das pessoas por itens plásticos descartáveis (Thompson et al., 2009; Mosquera, 2019). Essa dependência, combinada com a má gestão dos resíduos, resultou em impactos ambientais negativos para o meio ambiente, especialmente devido ao aumento do uso de plásticos de uso único. Uma das contribuições mais alarmantes atualmente a respeito da degradação dos materiais plásticos de uso único, está relacionada à poluição ocasionada por microplásticos, que quando entram em contato com agentes bióticos e abióticos, sofrem ação do intemperismo e entram nos ecossistemas de água doce (Wang & Wang, 2018).

Os microplásticos primários (> 5mm) são aqueles produzidos pela indústria, para o uso em produtos de higiene pessoal, construção civil, hospitalar e de cosméticos (Thompson et al., 2004). O glitter, composto de polietileno tereftalato (PET) revestido em camadas finas de alumínio para conferir brilho, são utilizados na composição de produtos cosméticos de tintas corporais, esmaltes e maquiagem, além de brinquedos, artesanatos e produtos de artes no geral. (Guerranti *et al.*, 2019) ainda não é classificado como microplástico primário pelos principais relatórios globais sobre poluição plástica, evidenciando uma lacuna no entendimento sobre os efeitos dessas partículas no ambiente e nos organismos, bem como, legislações que controlam a produção e utilização destes itens (Tagg & Ivar do Sul, 2019).

Estudos recentes apontam efeitos toxicológicos das partículas de glitter em produtores primários fotossintetizantes como *Raphdocelis subcapitata* (Piccardo et al., 2022). Em ensaios toxicológicos, foi associado à mortalidade dos microcrustáceos *Artemia* sp. e *Daphnia magna* indicaram mortalidade crescente até 48 horas de ensaio (Piccardo et al. 2022; Abessa et al., 2023). Em molusco marinho foram observados ainda o estresse oxidativo através da retenção das partículas no trato digestivo (Provenza et al., 2022). Apesar dos efeitos observados nos organismos, pesquisas sobre a toxicidade do glitter são escassas. Compreender os efeitos deste microplástico em organismos aquáticos é de grande importância, uma vez que podem interferir diretamente na composição das teias tróficas e comprometer os recursos para os níveis tróficos superiores.

Em ecossistemas aquáticos, o zooplâncton apresenta-se como um elo entre os produtores e consumidores, exercendo um papel fundamental na transferência de energia ao longo das teias tróficas, além de serem organismos vitais no ciclo dos nutrientes e na regulação do crescimento do fitoplâncton (Sterner, 2009). Além disso, eles contribuem significativamente para os serviços ecossistêmicos auxiliando em atividades pesqueiras, regulando o crescimento do fitoplâncton e melhorando a qualidade da água (Declerck & Senerpont Domis; 2023). As comunidades zooplanctônicas são influenciadas por vários parâmetros físico-químicos e as respostas a estas mudanças são observadas nos traços funcionais tais como, tamanho corporal e mortalidade, tornando estes organismos fundamentais para indicar a qualidade do ecossistema e mudanças ambientais (Litchman, Ohman & Koirboe, 2013; Vairagade, 2024).

Em geral, os microplásticos afetam a comunidade zooplanctônica nas taxas de alimentação, reprodução e sobrevivência, sendo os dafnídeos e os copépodes os mais afetados (Cole et al., 2013; Yu et al., 2020). No entanto, as normativas padrões, como a ABNT, sugerem em seus protocolos que os testes sejam realizados com espécies modelos como *Daphnia magna*, *Daphnia similis* e *Ceriodaphnia dubia*, que são espécies exóticas para o Brasil. Porém há

incentivos para realizar testes com espécies nativas, como *Ceriodaphnia silvestrii*, que possui uma facilidade de manutenção laboratorial, com uma ampla distribuição nos corpos hídricos brasileiros indicando que é um organismo potencialmente adequado para testes de toxicidade (Fonseca & Odete, 2004).

Dada essa influência, é essencial investigar como diferentes tipos de microplásticos afetam essas comunidades. O presente estudo buscou avaliar os efeitos ecotoxicológicos agudos das partículas de glitter em *Ceriodaphnia silvestrii* Daday 1902, com o objetivo de fornecer novos dados sobre os riscos ambientais associados a esse contaminante emergente.

2. METODOLOGIA

2.1 Cultivo das espécies *Ceriodaphnia silvestrii* Daday 1902 em laboratório

A espécie *C silvestrii* utilizada em nosso estudo foi cedida pelo cultivo de plâncton do laboratório de Ecotoxicologia da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR) em 2023 e mantidas em cultivo no Laboratório de Ecologia do Plâncton na Universidade Federal de Juiz de Fora até a realização dos experimentos. As culturas foram mantidas em água mineral Minalba sob fotoperíodo de 12:12h (claro/escuro) a 25 °C, alimentadas com microalga verde *Raphidocellis subcapitata* (Korshikov) Nygaard et al. 1987 e ração de peixe Biotrix® em dias alternados, sempre no período da manhã. As trocas de águas nas culturas foram realizadas duas vezes por semana para evitar a escassez de nutrientes e acúmulo de carapaças e organismos mortos. Para garantir neonatos viáveis nos experimentos, os adultos foram mantidos até a quarta gestação. Após isso, as cubas de cultivo foram renovadas utilizando neonatos selecionados dessa última gestação, e os demais organismos foram descartados.

2.2 Testes de sensibilidade

A fim de verificar a sensibilidade das espécies a um composto químico padronizado, foram realizadas Cartas Controle seguindo os protocolos estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas para Ensaio Toxicológicos ABNT - NBR (12713; 13376) (ABNT, NBR 2016; 2017).

Para os testes de sensibilidade foram utilizados 6 tratamentos com adição a substância de referência (KCl) e um tratamento controle, somente com meio de cultura (água mineral), sem adição da substância de referência. Os ensaios foram realizados em réplicas (n = 4) em tubos de ensaio com volume final de 10 mL contendo cinco neonatos com idade inferior a 24

horas. As concentrações para os ensaios de sensibilidade foram calculadas a partir de uma solução estoque de 1 g/L de KCl, como o recomendado pela NBR (12713; 13376) (tabela 1). Os organismos foram alimentados no dia anterior e não receberam alimentação durante a realização dos testes.

Os testes de sensibilidade foram conduzidos sob condições de cultivo em uma incubadora (D.B.O). Os tratamentos foram mantidos em condições controladas em temperatura a 22°C e fotoperíodo de 12:12 h (claro/escuro), durante 48 horas. Os organismos foram avaliados quanto à mortalidade após 24 e 48 horas de experimentação. Foram considerados organismos mortos aqueles que não apresentavam mobilidade, ou seja, o organismo era incapaz de nadar na coluna d'água após uma leve agitação do recipiente. Como parâmetro de padronização, adotamos uma margem de tempo de 10 segundos de observação para confirmar a imobilidade do animal, após esse período o organismo imóvel foi considerado morto e retirado dos frascos.

Os dados de mortalidade foram posteriormente utilizados para calcular a curva de dose resposta e encontrar valores de CL50 (Concentração letal para 50% da população utilizada nos testes). Os testes com foram repetidos de forma independente (n = 3) para diferentes gerações do cultivo, com intervalo de um mês entre elas.

Para montar a curva de dose resposta os valores obtidos nos ensaios de 24 e 48 horas foram plotados em escala logarítmica para obter os valores de CL50. As análises estatísticas foram realizadas por análise de variância (ANOVA/Kruskawallis) e Tukey.

2.3 Experimento com o glitter

Para os experimentos de toxicidade aguda com *C. silvestrii*, os tratamentos foram planejados a partir de uma concentração obtida da literatura, no estudo conduzido por Raju et al. (2022), em que foi encontrada uma concentração de $2,7 \times 10^7$ partículas/L em ambiente. No entanto, para obter dados com maior entendimento realizamos ajustes de unidades de medida para obter uma concentração em g/L. Com isso, calculamos o peso de uma partícula de glitter (0.0903 mg). E no final dos cálculos obtivemos como concentração estoque 0,24381 g/L.

Para os obter os valores dos finais dos tratamentos, utilizamos uma escala logarítmica. As concentrações testadas foram de 0,0012 (T1); 0,0122 (T2); 0,122 (T3) g/L. Para uma melhor visualização dos dados, transformamos as concentrações testadas de grama para micrograma por litro 0,012 (T1 – 5%) 0,122 (T2 50%) e 122 (T3 500%). Cada tratamento foi pesado individualmente em balança analítica, e posteriormente, 50 ml de água mineral foram adicionados. O grupo controle recebeu apenas 50 ml de água mineral, sem adição de alimento.

Com o auxílio de uma pipeta, os organismos foram transferidos de forma aleatória para os tratamentos, evitando a alteração da concentração final. Esses organismos foram liberados o mais próximo possível da solução para evitar a entrada de ar em sua carapaça, fazendo com que o organismo flutue.

Por fim, o desenho experimental contou com três tratamentos e um controle negativo, cada tratamento contou com três réplicas e em cada frasco foram adicionados cinco neonatos com idade inferior a 24 horas. Todo o experimento foi mantido sob fotoperíodo de 12/12 horas (claro e escuro) a 25 °C, em aeração constante para evitar a sedimentação das partículas de glitter. Os ensaios foram repetidos três vezes de maneira independente para a obtenção de dados para o cálculo da curva de dose resposta.

Após os ensaios de 24 e 48 horas, os organismos foram observados em microscópio estereoscópio para avaliar a mortalidade e os danos causados pelas partículas plásticas nos organismos. Em cada tratamento, os indivíduos mortos foram separados e colocados em frascos com solução de formalina a 4 % para avaliação posterior em Microscópio de Contraste Interferencial (DIC). Ao final do ensaio, os dados de mortalidade obtidos foram utilizados para avaliar a concentração letal CL₅₀. Os testes ANOVA/Kruskal - Wallis e Tukey foram utilizados para avaliar a diferença estatística entre os tratamentos utilizando o Software R 4.4.2, 2024, e Prisma 8.0, 2018.

Tabela 1: Concentrações de KCl utilizadas nos ensaios de sensibilidade com *Ceriodaphnia silvestrii*. As concentrações foram calculadas a partir de uma solução estoque de 1 g/L de KCl seguindo recomendações da NBR (12713).

Solução Teste (%)	Fator de diluição (FD)	Volume de amostra em ml	Volume de água de diluição ml	Volume final ml
100	1	250	-	250
50	2	125	125	250
25	4	62,5	187,5	250
12,5	8	31,25	218,75	250
6,25	16	15,625	234,375	250
3,12	32	7,812	242,188	250
Controle	-	-	250	250

3. RESULTADOS

3.1 Teste de sensibilidade e de toxicidade aguda do glitter em *Ceriodaphnia silvestrii*

3.1.1 Teste de sensibilidade

Após realização dos testes de sensibilidade com a substância de referência cloreto de potássio (KCl) em indivíduos de *C. silvestrii* encontramos valores de CL_{50} de 0,24 em 24 horas g/L, em 48 horas não foi possível achar a CL_{50} devido a mortalidade anormal no tratamento de menor concentração.

3.1.2 Ensaios com glitter

Os ensaios realizados com glitter revelaram valores de CL_{50} de 2.15 mg/L em 24 horas e 1,23 mg/L em 48 horas (Figura 1). Realizamos três experimentos independentes, no entanto apenas o primeiro experimento (Figura 1 a) estava com resultados compatíveis para a construção do gráfico de dose resposta. Os demais gráfico foram plotados, mas não serão considerados nesse estudo, pois não foi determinar uma CL_{50} devido a erro experimental, não permitindo obter um gráfico sigmoide.

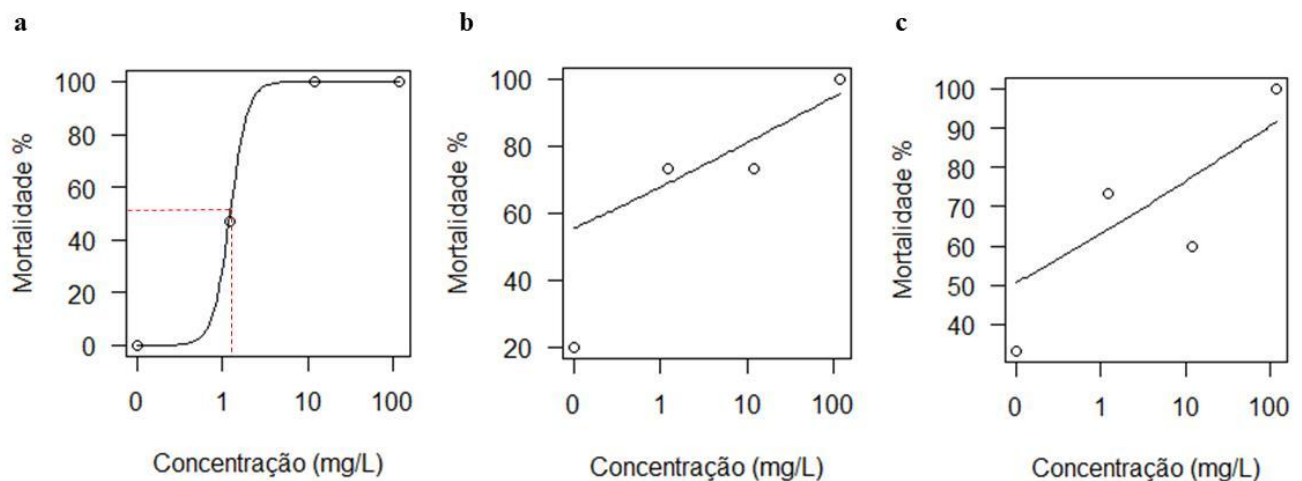


Figura 1: Resultado do teste toxicidade aguda do glitter em *Ceriodaphnia silvestrii*. Cada gráfico representa a curva dose-resposta mostrando a mortalidade de *Ceriodaphnia silvestrii* expostas a diferentes doses de glitter ao longo de 24. Linha tracejada em vermelho indicando a CL_{50} . (a) Primeiro experimento, (b) segundo experimento, (c) terceiro experimento.

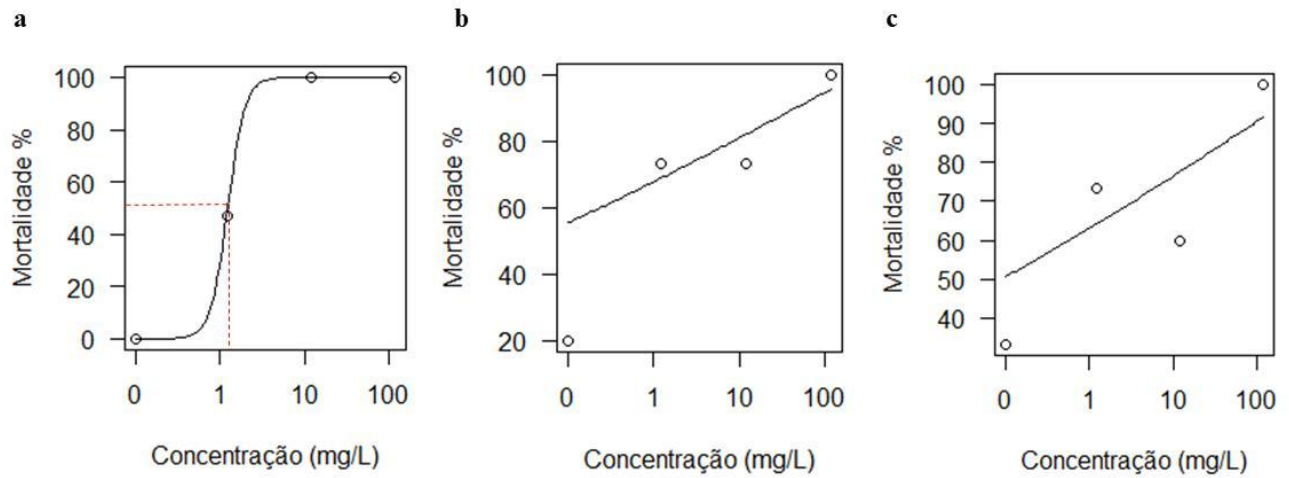


Figura 2: Resultado do teste toxicidade aguda do glitter em *Ceriodaphnia silvestrii*. Cada gráfico representa a curva dose-resposta mostrando a mortalidade de *Ceriodaphnia silvestrii* expostas a diferentes doses de glitter ao longo de 48 horas. Linha tracejada em vermelho indicando a CL_{50} . (a) Primeiro experimento, (b) segundo experimento, (c) terceiro experimento.

Ademais, observamos diferenças significativas entre o grupo controle e tratamento T2 ($p = 0,0299$), e também entre o grupo controle e T3 ($p = <0,0001$) em 24 horas. Em 48 horas de exposição observamos diferenças significativas entre o grupo controle e os tratamentos T2 ($p = 0,0251$) e T3 ($p = <0,0001$) (Figura 3).

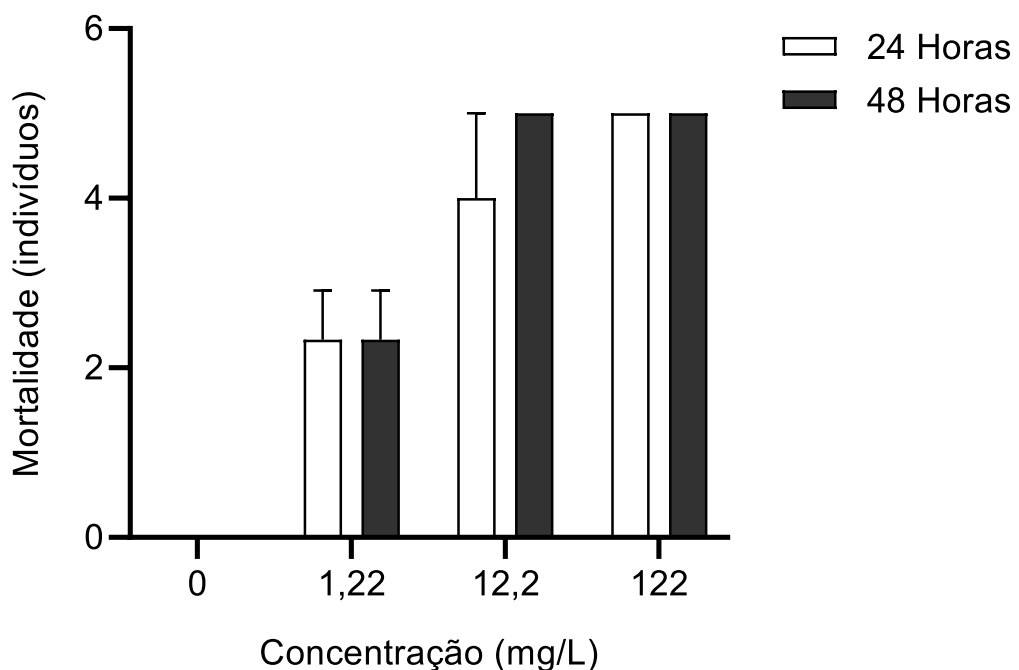


Figura 3: Gráfico de barras agrupadas apresentando diferenças entre os tratamentos obtidos após 24 horas e 48 horas de exposição. As barras brancas representam a mortalidade após 24 horas de exposição, enquanto as barras cinza escuro representam a mortalidade após 48 horas. As barras de erro indicam o desvio padrão

Além da mortalidade dos organismos após as exposições agudas, foram observados outros efeitos morfológicos aos organismos, como diminuição da capacidade de natação, onde os organismos permaneciam com batimentos cardíacos, porém sem deslocamento efetivo; danos à estrutura corporal, incluindo perda de apêndices; adesão de micropartículas de glitter nas carapaças e obstrução da locomoção dos organismos (Figuras 4a, 4b, 4c).

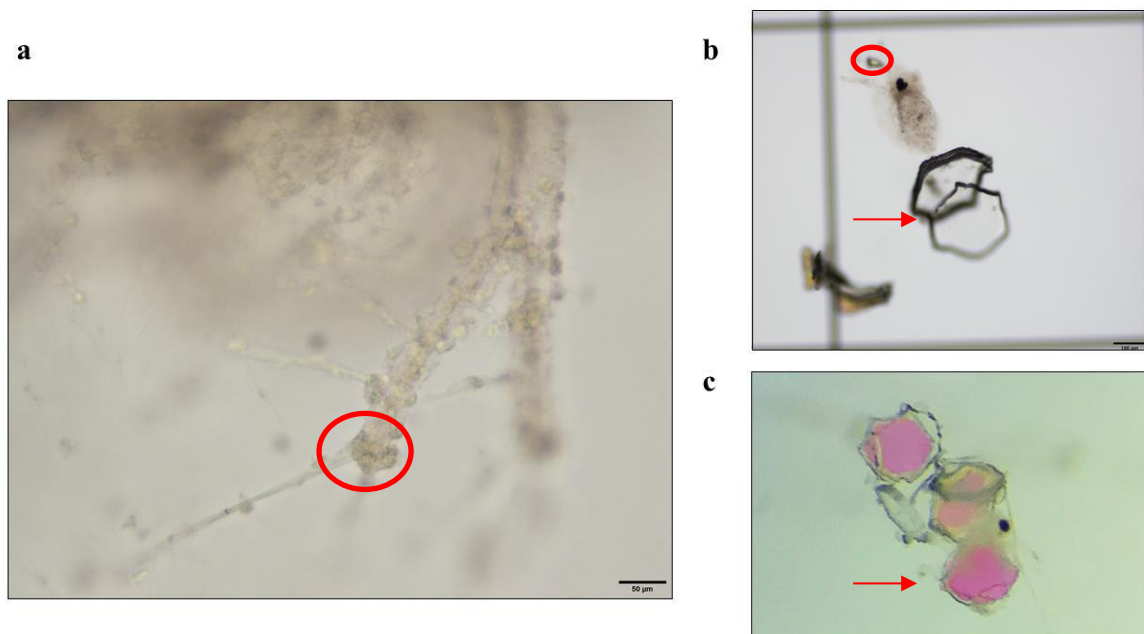


Figura 4: Danos morfológicos observados em *Ceriodaphnia silvestrii* expostos ao glitter. (a) Micropartículas de glitter aderidas nas antênulas. (b) Corpo do organismo aderido na superfície da partícula de glitter e uma partícula aderida na antênula. (c) Organismo preso entre duas partículas de glitter. Círculos em vermelho apontando partículas de glitter aderidas nas antênulas. Setas em vermelho indicando as partículas de glitter utilizadas.

Não foi possível realizar os experimentos com *Ceriodaphnia dubia* até o presente momento, porque as cubas passaram por contaminação, o que gerou um aumento na taxa de mortalidade dos organismos.

4. DISCUSSÃO

4.1 Toxicidade aguda do glitter em *Ceriodaphnia silvestrii*

Em nossos resultados, observamos que o glitter possui toxicidade aguda para os organismos de *Ceriodaphnia silvestrii* com uma CL_{50} de 2,15 mg/L em 24 horas e 1,23mg/L

em 48 horas. Em contrapartida, no estudo apresentado por Ziajahromi et al., 2017 em que testou os efeitos toxicológicos de fibras e esferas de polietileno (PET) apresentaram CL_{50} de 1,5 e 2,2 mg/L respectivamente. Demonstrando que *C. silvestrii* pode ser mais tolerante a poluição plástica que *C. dubia*, uma vez que apresentaram CL_{50} inferior (2,15 mg/L) aos apresentados em estudo anterior para *C. dubia*.

Observamos também, danos à estrutura morfológica e imobilização do animal, impedindo-o de nadar devido a presença das partículas glitter aderidas aos apêndices, e a remoção de partes do corpo do organismo. Resultados similares foram encontrados a espécie *C. dubia* apresentava mortalidade completa (100%) em concentrações de 4 mg/L para fibras de poliéster e 8 mg/L para grânulos de polietileno nos ensaios agudos e apresentaram danos a natação, além disso foi registrado emaranhamento das fibras incapacitando a natação (Ziajahromi et al., 2017). Além disso, estudos realizados com Cladocera de água doce como *Daphnia similis*, demonstram que os microplásticos causam danos a natação, devido ao emaranhamento das partículas nos apêndices ocasionando na liberação de radicais livre (de Castro et al., 2023; Jeyavani et al 2023). Para *Moina micrura* foi observado danos provocados ao trato gastrointestinal, dificultando a excreção dos indivíduos, causados por micropartícula plástica de Polietileno Teraftalato (PET) (Portugal et al 2021). Além disso, outros danos causados pelos microplásticos ao zooplâncton vem sendo documentados, como a diminuição na taxa de alimentação (Cole et al., 2013b), taxa de fecundidade, sobrevivência (Lee et al., 2013) e alterações físico-químicas ocasionando estresse ao animal (Yin et al., 2023). Para o copépode *Tigriopus japonicus* os efeitos causados pela poluição de microplásticos poliestireno está relacionado a aumento da mortalidade e diminuição no desenvolvimento corporal no tempo de reprodução e na diminuição da taxa de alimentação ocasionando estresse oxidativo (Kim et al., 2022).

O zooplâncton, sendo um elo crucial na cadeia trófica, pode expor espécies de peixes pelágicos plânctívoros aos microplásticos, o que pode causar sérios danos a essas populações. No estudo de Lopes et al. (2020), por exemplo, foi observado que espécies de peixes com dieta plânctívora que se alimentavam de zooplâncton de maior porte apresentavam uma maior concentração de microplásticos no estômago. Em contrapartida, estudos experimentais que simulam o ambiente nem sempre apresentam dados robustos sobre esses efeitos, Klasios et al. (2024), por exemplo, não observaram efeitos toxicológicos das fibras de polietileno na comunidade zooplânctônica presente em um mesocosmo. Dado os efeitos causados por microplástico em espécies de zooplâncton, é de suma importância mais estudos abordando diferentes grupos.

5. CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho, observamos que indivíduos de *Ceriodaphnia silvestrii* apresentaram CL_{50} de 2,15 mg/L em 24 horas e 1,23 mg/L em 48 horas, que promoveu um aumento exponencial nas taxas de mortalidade com o aumento das concentrações dos tratamentos. Esses resultados foram decorrentes dos efeitos associados à aderência das partículas em seus apêndices, causando bloqueio natatório e desmembramento de partes do corpo do organismo. Por *C. silvestrii* ser uma espécie nativa com ampla distribuição nos corpos hídricos do Brasil, este estudo ressalta a importância de pesquisas que abordem a poluição plástica com organismos nativos, fornecendo dados comparáveis e possibilitando uma compreensão mais precisa dos danos causados à biodiversidade local.

Ao longo desse trabalho também foi possível observar poucos trabalhos abordando a toxicidade do glitter em animais de água doce e no sistema, criando uma lacuna em relação a esse conhecimento, e reforçando a necessidade de mais estudos experimentais e de coletas em campo a respeito o comportamento das partículas de glitter e o quanto essa poluição pode ser nociva a diferentes grupos de organismo. Devido aos perigos que essas partículas podem apresentar, se faz necessário a implementação por parte de agências governamentais, em incluir o glitter como microplástico primário e assim apresentar os seus riscos a biodiversidade, além disso, também é necessárias regulações de seu uso, através de leis e políticas públicas educativas a respeito do consumo desse material, uma vez que por serem partículas muito pequenas não podem ser recicladas.

CONCLUSÃO GERAL

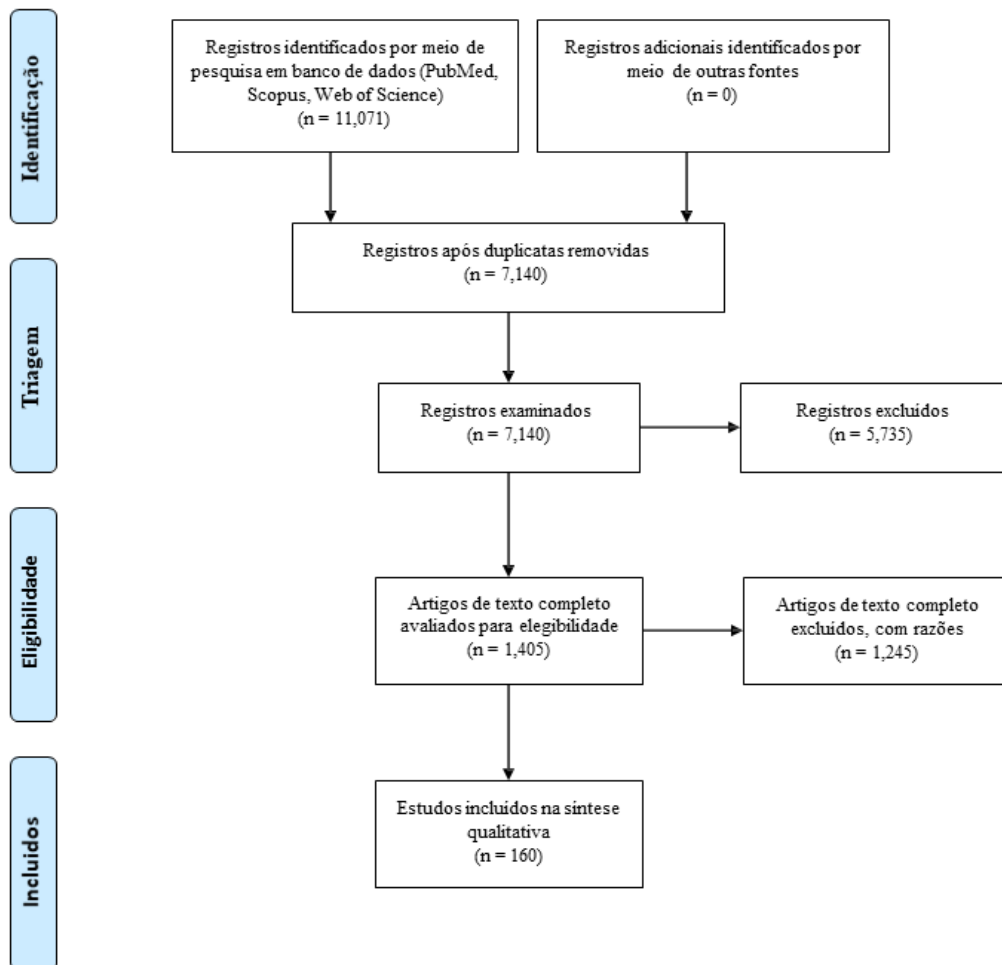
Ao final desta dissertação observamos que a poluição plástica afeta os organismos aquáticos, tanto de ambientes costeiros, como aqueles que vivem em água doce. Dentro do que foi observado, os estuários são os ambientes costeiros mais afetados, devido a atividades humanas, principalmente o turismo, pesca e transporte marítimo, além disso, a própria particularidade do sistema propicia o acúmulo de itens plásticos originados em alto mar e nos rios poluídos. Esse alto nível de poluição em ambientes costeiros vem afetando anualmente os animais que dependem desse ecossistema para viver, como os moluscos, crustáceos e peixes, animais estes que foram os mais afetados pela poluição plástica, segundo os dados obtidos neste trabalho. Com isso reforçamos a necessidade de políticas públicas de regulação dos usos de plásticos e uma maior penalização a quem faz descarte incorreto desses materiais, além disso, estender a proibição de alguns itens de uso único, como o que já vem sendo observado em países desenvolvidos. Outro fator importante seria abordar os assuntos junto à comunidade acadêmica e civil, por meio da educação ambiental. Com essas medidas implementadas, será possível que haja um controle maior na poluição de ambientes costeiros.

E o mesmo é válido para os ambientes de água doce, que como o observado neste trabalho, a poluição por microplástico afeta os organismos zooplânctônicos que são indispensáveis ao ambiente aquático, por constituírem um elo entre produtores e consumidores. E nossos resultados reforçou que o glitter que é uma partícula plástica fabricada para compor produtos de cosméticos, brinquedos e tintas, atribuindo brilho aos produtos, quando em contato com o ambiente aquático essas partículas ameaçam o zooplâncton. No entanto, o glitter ainda não é um produto classificado como microplástico, e a ausência dessa classificação faz com que esse produto passe despercebido das discussões globais sobre o controle da poluição plástica. Além disso, poucos estudos trazem dados sobre a interação das partículas de glitter com os organismos de água doce, criando uma lacuna no conhecimento a respeito dos impactos que possam causar ao meio ambiente. Com isso, reforçamos a necessidade de mais trabalhos com o objetivo de verificar a toxicidade do glitter em todos os níveis tróficos e também o quanto desse material já está disponível no ambiente, bem como, o seu tempo de permanência até a decomposição completa no ambiente e da liberação dos subprodutos aos sistemas. Com esses resultados, será possível regular os usos do glitter e até mesmo, proibir o uso em produtos que não há a necessidade desse material.

Por tanto, ao confirmar os danos causados à biodiversidade aquática, é fundamental que existam iniciativas por partes dos governos a respeito do controle da produção de itens plásticos e a gestão consciente dos resíduos, incentivando a reciclagem e a economia circular, principalmente em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento. Além disso, incentivar um consumo consciente dos utensílios plásticos e substituição por outros itens. Com isso, combinando iniciativas sociais e políticas públicas, é possível que haja um controle da poluição plástica no mundo.

APÊNDICE A – MATERIAL SUPLEMENTAR

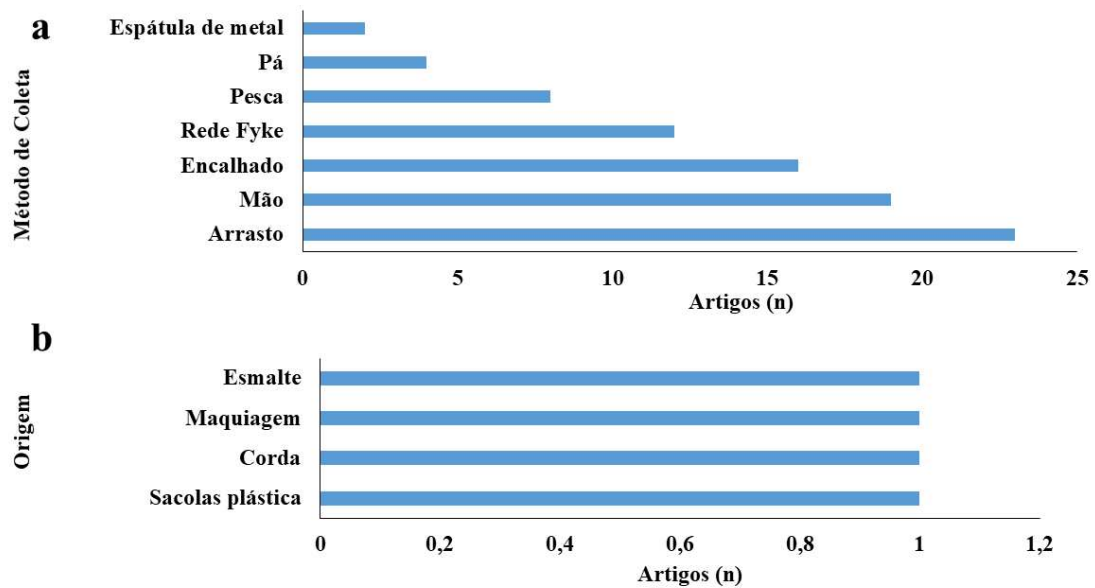
MS1. Diagrama PRISMA



From: Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, The PRISMA Group (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. PLoS Med 6(7): e1000097. doi:10.1371/journal.pmed1000097

For more information, visit www.prisma-statement.org.

MS2. Métodos de capturas de animais em campo e para laboratório e origem dos plásticos em artigos experimentais.



(a) Métodos de coleta observados em todos os estudos observacionais e experimentais: arrasto (n = 23), manual (n = 19), animais encalhados (n = 16), rede Fyker (n = 12), pesca (n = 8). Os outros métodos de coleta tiveram menos de 5 publicações cada. (b) Origem dos plásticos usados nos artigos experimentais, sacola plástica, corda, maquiagem e glitter do esmalte tiveram uma publicação cada

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABESSA, D. M. de S. et al. A Glow before Darkness: Toxicity of Glitter Particles to Marine Invertebrates. *Toxics*, v. 11, n. 7, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/toxics11070617>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- ALIMBA, C. G.; FAGGIO, C. Microplastics in the marine environment: Current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, v. 68, p. 61–74, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.001>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- ANDRADY, A. L. The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, v. 119, n. 1, p. 12–22, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica — Método de ensaio com Daphnia spp (Crustacea, Cladocera)*. 4. ed. NBR 12713, 2016. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica — Método de ensaio com Ceriodaphnia spp (Crustacea, Cladocera)*. 5. ed. NBR 13373, 2017. 20 p.
- AVIO, C. G. et al. Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels. *Environmental Pollution*, v. 198, p. 211–222, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.021>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- AZEVEDO-SANTOS, V. M. et al. Plastic pollution: A focus on freshwater biodiversity. *Ambio*, v. 50, n. 7, p. 1313–1324, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01496-5>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- BARNES, D. K. A. et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p.

1985–1998, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>. Acesso em: 24 jul. 2024.

BHATT, Vaishali; CHAUHAN, Jaspal Singh. Microplastic in freshwater ecosystem: bioaccumulation, trophic transfer, and biomagnification. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 4, p. 9389-9400, 2023.

BISWAS, T.; PAL, S. C. Emerging threats of microplastics on marine environment: A critical review of toxicity measurement, policy practice gap and future research direction. *Journal of Cleaner Production*, v. 434, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139941>. Acesso em: 24 jul. 2024.

BRINKHOFF, T. World by Map. Disponível em: <https://www.citypopulation.de/en/world/bymap/coastlines/>. Acesso em: 23 jul. 2024.

BROWNE, Mark A. Sources and pathways of microplastics to habitats. *Marine anthropogenic litter*, p. 229-244, 2015.

BRUSCA, R. C.; MOORE, W.; SHUSTER, S. M. *Invertebrates*. 3. ed. Oxford: Oxford University Press, 2018.

BOND, T. et al. The occurrence and degradation of aquatic plastic litter based on polymer physicochemical properties: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 48, n. 7–9, p. 685–722, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1483155>.

CHEN, J. Y. S.; LEE, Y. C.; WALTHER, B. A. Microplastic contamination of three commonly consumed seafood species from Taiwan: A pilot study. *Sustainability*, v. 12, n. 22, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12229543>.

COLE, M. et al. Microplastic ingestion by zooplankton. *Environmental Science and Technology*, v. 47, n. 12, p. 6646–6655, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es400663f>.

CONSOLI, P. et al. Marine litter from fishery activities in the Western Mediterranean Sea: The impact of entanglement on marine animal forests. *Environmental Pollution*, v. 249, p. 472–481, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.072>.

- CUNNINGHAM, D. J.; WILSON, S. P. Marine debris on beaches of the Greater Sydney Region. *Journal of Coastal Research*, p. 421-430, 2003.
- DE CASTRO, D. G. et al. Effects of PET microplastics on the freshwater crustacean *Daphnia similis* Claus, 1976. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 35, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X4422>.
- DE DEUS, B. C. T. et al. Coastal plastic pollution: A global perspective. *Marine Pollution Bulletin*, v. 203, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116478>.
- DING, J. et al. Toxicological effects of nano- and micro-polystyrene plastics on red tilapia: Are larger plastic particles more harmless? *Journal of Hazardous Materials*, v. 396, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122693>.
- DOVZHENKO, N. V. et al. Plastics as vehicles of chemical compounds to marine organisms. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 548, n. 4.
- FAZEY, F. M. C.; RYAN, P. G. Debris size and buoyancy influence the dispersal distance of stranded litter. *Marine Pollution Bulletin*, v. 110, n. 1, p. 371–377, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.039>.
- FONSECA, A. L.; ROCHA, O. The life-cycle of *Ceriodaphnia silvestrii* Daday, 1902, a neotropical endemic species (Crustacea, Cladocera, Daphnidae). *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 16, n. 4, p. 319-328, 2004.
- GALAFASSI, S.; NIZZETTO, L.; VOLTA, P. Plastic sources: A survey across scientific and grey literature for their inventory and relative contribution to microplastics pollution in natural environments, with an emphasis on surface water. *Science of the Total Environment*, v. 693, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.305>.
- GALL, S. C.; THOMPSON, R. C. The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, v. 92, n. 1–2, p. 170–179, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041>.

- GASPERI, Johnny et al. Micropollutants in urban stormwater: occurrence, concentrations, and atmospheric contributions for a wide range of contaminants in three French catchments. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, p. 5267-5281, 2014.
- GEOLocate - Software for Georeferencing Natural History Data. Disponível em: <https://www.geolocate.org>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.
- GREEN, Dannielle S. et al. Exposure to microplastics reduces attachment strength and alters the haemolymph proteome of blue mussels (*Mytilus edulis*). *Environmental pollution*, v. 246, p. 423-434, 2019.
- GRIFFITH, R. M. et al. Differential effects of microplastic exposure on leaf shredding rates of invasive and native amphipod crustaceans. *Biological Invasions*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10530-023-03178-1>.
- GOOGLE MAPS. Google Maps. Disponível em: <https://www.google.com/maps>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- GUNAALAN, K.; FABBRI, E.; CAPOLUPO, M. The hidden threat of plastic leachates: A critical review on their impacts on aquatic organisms. *Water Research*, v. 184, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116170>.
- GÜNDOĞDU, Sedat; CEVIK, Cem. Mediterranean dirty edge: High level of meso and macroplastics pollution on the Turkish coast. *Environmental Pollution*, v. 255, p. 113351, 2019.
- HÄMER, Julia et al. Fate of microplastics in the marine isopod *Idotea emarginata*. *Environmental science & technology*, v. 48, n. 22, p. 13451-13458, 2014.
- HICKMAN, C. P. *Integrated Principles of Zoology*. 17. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

- HIDALGO-RUZ, V. et al. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science and Technology*, v. 46, n. 6, p. 3060–3075, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es2031505>.
- HITCHCOCK, J. N.; MITROVIC, S. M. Microplastic pollution in estuaries across a gradient of human impact. *Environmental Pollution*, v. 247, p. 457–466, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.069>.
- HODKOVICOVA, N. et al. Effects of plastic particles on aquatic invertebrates and fish – A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, v. 96, p. 104013, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.104013>.
- IUCN. Issues Brief. Marine Plastic Pollution. Switzerland, nov. 2021. Disponível em: <https://www.iucn.org/resources/issues-brief/marine-plastic-pollution>. Acesso em: 16 mar. 2024.
- JAMBECK, Jenna R. et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. *science*, v. 347, n. 6223, p. 768-771, 2015.
- JEYAVANI, J. et al. Ingestion and impacts of water-borne polypropylene microplastics on *Daphnia similis*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 5, p. 13483–13494, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23013-9>.
- JONES, S.; HEAD, B. W. The limits of voluntary measures: Packaging the plastic pollution problem in Australia. *Australian Journal of Public Administration*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1467-8500.12614>.
- KEDZIERSKI, Mikaël et al. Why is there plastic packaging in the natural environment? Understanding the roots of our individual plastic waste management behaviours. *Science of the total environment*, v. 740, p. 139985, 2020.
- KLASIOS, N.; KIM, J. O.; TSENG, M. No effect of realistic concentrations of polyester microplastic fibers on freshwater zooplankton communities. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 43, n. 2, p. 418–428, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/etc.5797>.

- KNOBLAUCH, D.; MEDERAKE, L. Government policies combatting plastic pollution. *Current Opinion in Toxicology*, v. 28, p. 87–96, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.10.003>.
- KOR, K.; MEHDINIA, A. Neustonic microplastic pollution in the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, v. 150, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110665>.
- LACERDA, Ana L. d F. et al. Plastics in sea surface waters around the Antarctic Peninsula. *Scientific reports*, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2019.
- LEBRETON, L. C. M. et al. River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, v. 8, n. 1, p. 15611, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms15611>.
- LEE, K.-W. et al. Size-dependent effects of micro polystyrene particles in the marine copepod *Tigriopus japonicus*. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 19, p. 11278–11283, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es401932b>.
- LI, P. et al. Characteristics of plastic pollution in the environment: A review. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 107, n. 4, p. 577–584, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02820-1>.
- MACLEOD, M. et al. The global threat from plastic pollution. Disponível em: <https://www.science.org>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- MARTÍ, E. et al. The colors of the ocean plastics. *Environmental Science & Technology*, v. 54, n. 11, p. 6594–6601, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06400>.
- MEIKLE, Jeffrey L. Into the Fourth Kingdom: Representations of Plastic Materials, 1920-1950. *Journal of Design History*, v. 5, n. 3, p. 173-182, 1992.
- MILLER, M. E.; HAMANN, M.; KROON, F. J. Bioaccumulation and biomagnification of microplastics in marine organisms: A review and meta-analysis of current data. *PLOS ONE*, v. 15, n. 10, e0240792, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240792>.

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, v. 4, n. 1, p. 1, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1>.

MOSQUERA, M. R. Banning plastic straws: the beginning of the war against plastics. *Earth Jurisprudence & Environmental Justice Journal*, v. 9, p. 5, 2019.

NELMS, S. E. et al. Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators. *Environmental Pollution*, v. 238, p. 999–1007, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.016>.

NAPPER, Imogen Ellen; THOMPSON, Richard C. Plastic debris in the marine environment: history and future challenges. *Global Challenges*, v. 4, n. 6, p. 1900081, 2020.

OBBARD, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future*, v. 2, n. 6, p. 315–320, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>.

OUYANG, C. L. et al. Tripartite evolutionary game analysis for plastic pollution prevention and control under the background of China's plastic ban. *Sustainability*, v. 14, n. 4, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14042179>.

PALMER, J.; HERAT, S. Ecotoxicity of microplastic pollutants to marine organisms: a systematic review. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 232, n. 5, p. 195, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05155-7>.

PEDERSEN, Adam F. et al. Microplastic ingestion by quagga mussels, *Dreissena bugensis*, and its effects on physiological processes. *Environmental Pollution*, v. 260, p. 113964, 2020.

PENG, L. et al. Micro- and nano-plastics in marine environment: Source, distribution and threats — A review. *Science of The Total Environment*, v. 698, p. 134254, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134254>.

- PICCADO, M. et al. Ecotoxicological assessment of “glitter” leachates in aquatic ecosystems: an integrated approach. *Toxics*, v. 10, n. 11, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/toxics10110677>.
- PORTUGAL, S. G. M. et al. Uptake of microplastics by a tropical freshwater Cladocera revealed by polyethylene terephthalate fluorescence. *Water, Air and Soil Pollution*, v. 232, n. 8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05291-0>.
- PROVENZA, F. et al. Sparkling plastic: Effects of exposure to glitter on the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, v. 96, p. 103994, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103994>.
- PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Ação planetária. 2021.
- RASMUSSEN, Seth C. From parkesine to celluloid: the birth of organic plastics. *Angewandte Chemie*, v. 133, n. 15, p. 8090-8094, 2021.
- RYAN, P. G. et al. Impacts of plastic ingestion on post-hatchling loggerhead turtles off South Africa. *Marine Pollution Bulletin*, v. 107, n. 1, p. 155–160, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.005>.
- SABOROWSKI, Reinhard; PAULISCHKIS, Eva; GUTOW, Lars. How to get rid of ingested microplastic fibers? A straightforward approach of the Atlantic ditch shrimp *Palaemon varians*. *Environmental Pollution*, v. 254, p. 113068, 2019.
- SANTOS, R. G. et al. Marine debris ingestion and Thayer’s law – The importance of plastic color. *Environmental Pollution*, v. 214, p. 585–588, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.024>.
- SAVENIJE, H. H. G. *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. Elsevier, 2005.
- SCANES, Elliot; WOOD, Heather; ROSS, Pauline. Microplastics detected in haemolymph of the Sydney rock oyster *Saccostrea glomerata*. *Marine pollution bulletin*, v. 149, p. 110537, 2019.

- SCIUTTERI, V. et al. Integrated approach for marine litter pollution assessment in the southern Tyrrhenian Sea: Information from bottom-trawl fishing and plastic ingestion in deep-sea fish. *Marine Pollution Bulletin*, v. 188, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114661>.
- SELTENRICH, N. New link in the food chain? Marine plastic pollution and seafood safety. *Environmental Health Perspectives*, v. 123, n. 2, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/ehp.123-A34>.
- SÉRVULO, T. et al. Plasticsphere composition in a subtropical estuary: Influence of season, incubation time and polymer type on plastic biofouling. *Environmental Pollution*, v. 332, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121873>.
- SOFI, I. R. et al. Plastic pollution and the ecological impact on the aquatic ecosystem. In: *Plastic pollution and ecological impact*. Hershey: IGI Global, 2020. p. 80–93. Disponível em: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9452-9.ch005>.
- STERNER, R. W. Role of zooplankton in aquatic ecosystems. In: *Encyclopedia of inland waters*. Elsevier, 2009. p. 678–688. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00153-8>.
- SUSANTI, N. K. Y.; MARDIASTUTI, A.; WARDIATNO, Y. Microplastics and the impact of plastic on wildlife: a literature review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 528, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/528/1/012013>.
- TAGG, A. S.; IVAR DO SUL, J. A. Is this your glitter? An overlooked but potentially environmentally-valuable microplastic. *Marine Pollution Bulletin*, v. 146, p. 50–53, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.068>.
- THOMPSON, R. C. et al. Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, v. 304, n. 5672, p. 838, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1094559>.

- THOMPSON, R. C. et al. Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p. 1973–1976, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>.
- THUSHARI, G. G. N.; SENEVIRATHNA, J. D. M. Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, v. 6, n. 8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04709>.
- VAN EMMERIK, Tim et al. Hydrology as a driver of floating river plastic transport. *Earth's Future*, v. 10, n. 8, p. e2022EF002811, 2022.
- VERLIS, Krista M.; WILSON, Scott P. Paradise trashed: Sources and solutions to marine litter in a small island developing state. *Waste Management*, v. 103, p. 128-136, 2020.
- TUURI, E. M.; LETERME, S. C. How plastic debris and associated chemicals impact the marine food web: a review. *Environmental Pollution*, v. 321, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121156>.
- WANG, W.; WANG, J. Investigation of microplastics in aquatic environments: an overview of the methods used, from field sampling to laboratory analysis. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, v. 108, p. 195–202, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.026>.
- WWF WORLD WIDE FUND FOR NATURE. Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização. 2019. Disponível em: <https://promo.wwf.org.br/solucionar-a-poluicao-plastica-transparencia-e-responsabilizacao>.
- YIN, J. et al. Ecotoxicology of microplastics in *Daphnia*: a review focusing on microplastic properties and multiscale attributes of *Daphnia*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 249, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114433>.
- YU, Yangmei; MO, Wing Yin; LUUKKONEN, Tero. Adsorption behaviour and interaction of organic micropollutants with nano and microplastics—a review. *Science of the Total Environment*, v. 797, p. 149140, 2021.

ZIAJAHROMI, S. et al. Impact of microplastic beads and fibers on waterflea (*Ceriodaphnia dubia*) survival, growth, and reproduction: implications of single and mixture exposures.

Environmental Science & Technology, v. 51, n. 22, p. 13397–13406, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03574>.

ZETTLER, Erik R.; MINCER, Tracy J.; AMARAL-ZETTLER, Linda A. Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environmental science & technology*, v. 47, n. 13, p. 7137-7146, 2013.

ZITOUNI, N. et al. Uptake, tissue distribution and toxicological effects of environmental microplastics in early juvenile fish *Dicentrarchus labrax*. *Journal of Hazardous Materials*, v. 403, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124055>.