



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA/LAGEMAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DE OCEANOS E DA TERRA

Lara Luiza de Oliveira Pompermayer

**MICROPLÁSTICOS EM AQUÍFEROS: REVISÃO DA LITERATURA E
EVIDÊNCIAS DE CONTAMINAÇÃO EM POÇOS ARTESIANOS DE
MARICÁ, RJ**

Orientador: José Antônio Baptista Neto

Niterói – RJ

2025

Lara Luiza de Oliveira Pompermayer

**Microplásticos em Aquíferos: Revisão da Literatura e Evidências de
Contaminação em Poços Artesianos de Maricá, RJ**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense como requisito à avaliação para obtenção do grau de Doutora.

Orientador: Prof.º Dr.º Jose Antonio Baptista Neto

Área de concentração: Biogeoquímica

Niterói – RJ

2025

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

O48m Oliveira Pompermayer, Lara Luiza de
Microplásticos em Aquíferos: Revisão da Literatura e
Evidências de Contaminação em Poços Artesianos de Maricá,
RJ / Lara Luiza de Oliveira Pompermayer. - 2025.
106 f.: il.

Orientador: Jose Antonio Baptista Neto.
Coorientador: Khauê Silva Vieira.
Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto
de Geociências, Niterói, 2025.

1. Microplástico em Águas Subterrâneas. 2. Revisão de
Microplástico em Águas Subterrâneas. 3. Produção
intelectual. I. Baptista Neto, Jose Antonio, orientador. II.
Silva Vieira, Khauê, coorientador. III. Universidade Federal
Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

Lara Luiza de Oliveira Pompermayer

Microplásticos em Aquíferos: Revisão da Literatura e Evidências de Contaminação em Poços Artesianos de Maricá, RJ

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense como requisito à avaliação para obtenção do grau de Doutora.

Aprovada em 08 de Abril de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Dr. JOSE ANTONIO BAPTISTA NETO/PPGDOT-UFF - Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE ANTONIO BAPTISTA NETO
Data: 10/09/2024 10:06:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. KHAUÊ SILVA VIEIRA/UFF - Co-orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br KHAUÊ SILVA VIEIRA
Data: 11/09/2024 15:05:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. ANDRÉ LUIZ CARVALHO DA SILVA/UERJ

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRÉ LUIZ CARVALHO DA SILVA
Data: 12/09/2024 12:19:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. DIEGO GOMES DE CARVALHO/UFF

Documento assinado digitalmente
gov.br DIEGO GOMES DE CARVALHO
Data: 31/03/2025 16:29:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr (a). STELLA MELGAÇO DE OLIVEIRA PINTO/UFF

Documento assinado digitalmente
gov.br STELLA MELGACO DE OLIVEIRA PINTO
Data: 01/04/2025 14:05:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CANDIDATO(A): LARA LUIZA DE OLIVEIRA POMPERMAYER

Documento assinado digitalmente
gov.br LARA LUIZA DE OLIVEIRA POMPERMAYER
Data: 01/04/2025 15:35:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Niterói – RJ
2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda e sincera gratidão a todas as pessoas que desempenharam um papel essencial na realização e conclusão desta pesquisa.

Começo agradecendo o meu orientador, José Antônio, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e pela confiança. Estendo também minha gratidão ao meu coorientador, Khauê Vieira, por compartilhar conhecimento de forma generosa.

À minha mãe, Neta, um exemplo de força e amor, que sempre acreditou no meu potencial e nunca mediu esforços para me apoiar. Ao meu pai, Marcelo, meu porto seguro nos momentos difíceis, cuja dedicação e suporte inabalável me deram coragem para seguir em frente. Aos meus irmãos, Diogo, Pietro, Isadora e Théo, que trouxeram luz e alegria ao meu caminho, e especialmente aos Tâmilis, cuja presença amorosa encheu até os dias mais exigentes de afeto e tranquilidade.

Aos meus queridos avós, Helena, Sara e Antônio, minha eterna gratidão pelo carinho e pelo conforto que sempre proporcionaram ao meu coração. Em memória ao meu avô Clemente (Vô LÉ), levo comigo a certeza de que ele se orgulharia imensamente da minha trajetória e das conquistas que hoje celebro.

Ao meu companheiro de vida, Raphael, que esteve ao meu lado desde os tempos da faculdade, agradeço por seu amor constante, paciência infinita e por tornar cada etapa mais leve e significativa. Meu carinho se estende também à sua mãe, Rosana, que me acolheu com generosidade e carinho, facilitando minha caminhada.

Aos amigos especiais que enriqueceram meus dias com risos, apoio e afeto: Erika, Izabela, Joel, Beatriz e Victor. Vocês criaram momentos mais leves e inesquecíveis de maneiras únicas e insubstituíveis.

À equipe do Projeto Lagoa Viva – Maricá e aos colaboradores desta pesquisa, em especial Alex Freitas, Ana Dalva e Daniele Cunha, minha mais sincera gratidão pelo seu apoio, pelo compartilhamento de conhecimentos e pela inspiração que sempre trouxeram ao meu trabalho.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, deixaram sua marca na jornada. Cada gesto de generosidade, cada palavra de incentivo e cada ato de amor desenvolvido para a realização deste sonho.

Hoje, ao olhar para trás, percebo que não apenas construí minha formação como doutora, mas também cresci como pessoa. Foi o amor, o apoio e a confiança de todos vocês que me permitiram chegar até aqui. Muito obrigada.

"No meio do inverno, descobri que havia dentro de mim um verão invencível."

Albert Camus

RESUMO

A presença de microplásticos (Mps) em águas subterrâneas tem se tornado uma preocupação crescente devido aos impactos ambientais e a potencial ameaça à qualidade dos recursos hídricos essenciais. Embora a contaminação por Mps em ambientes marinhos e superficiais tenha sido amplamente estudada, a presença desses poluentes em aquíferos ainda é pouco explorada, especialmente na América Latina. Esta tese foi estruturada em duas frentes principais: (i) uma revisão sistemática de 127 artigos publicados entre 2014 e 2024 sobre a contaminação por Mps em águas subterrâneas e (ii) um estudo de caso no município de Maricá, região metropolitana do Rio de Janeiro, Brasil. A revisão destacou lacunas regionais e metodológicas, evidenciando que apenas 32 estudos realizaram coletas diretas em águas subterrâneas, com predominância de pesquisas na China, Índia e Coreia, enquanto a América Latina contribuiu com apenas sete artigos, dos quais somente dois analisaram amostras diretamente. Os polímeros mais identificados foram polietileno (PE), polipropileno (PP) e poliamida (PA), sendo fibras e fragmentos as formas predominantes. A revisão reforça a necessidade de padronização metodológica e do uso de tecnologias avançadas, como μ FTIR e μ Raman, para a caracterização precisa dos Mps. O estudo de caso em Maricá consistiu na coleta de amostras de 126 poços distribuídos em nove zonas do município, seguindo rigorosos protocolos para evitar contaminação externa. Os Mps foram retidos em membranas de acetato de celulose (0,45 μ m) e analisados sob microscopia de alta precisão. Plásticos foram detectados em 94 dos 126 poços, com concentrações variando entre 13 e 63 itens/L. A maior parte das partículas encontradas (96,4%) eram fibras, predominantemente azuis. Em relação ao tamanho, 41,3% foram classificados como Mps, enquanto 58,7% eram meso e macroplásticos. Entre as 45 amostras analisadas por espectroscopia μ FTIR, 40% das partículas eram celulose, enquanto PE foi identificado em 15,9%, seguido de PA, PET e PS (9,1% cada). Presença de Mps na região pode estar associada a fatores como infraestrutura de saneamento precária, alta permeabilidade do solo e conectividade hidráulica entre aquíferos, lagoas e o oceano. Os resultados desta tese não apenas contribuem para a compreensão da contaminação por Mps em águas subterrâneas, mas também reforçam a urgência de políticas públicas para mitigar essa poluição. Medidas como o descarte adequado de plásticos e estratégias para a proteção dos aquíferos são essenciais para garantir a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

Palavras-chave: Microplásticos, Águas Subterrâneas, Poluição Plástica, Espectroscopia μ ftir, Revisão Bibliográfica

ABSTRACT

The presence of microplastics (Mps) in groundwater has become an increasing concern due to its environmental impact and the potential threat to the quality of essential water resources. While MP contamination in marine and surface environments has been extensively studied, the presence of these pollutants in aquifers remains largely unexplored, particularly in Latin America. This thesis was structured into two main components: (i) a systematic review of 135 articles published between 2014 and 2024 on MP contamination in groundwater and (ii) a case study conducted in the municipality of Maricá, located in the metropolitan region of Rio de Janeiro, Brazil. The review highlighted regional and methodological gaps, revealing that only 32 studies involved direct groundwater sampling, with research predominantly conducted in China, India, and Korea, while Latin America contributed only seven articles, of which only two directly analyzed groundwater samples. The most frequently identified polymers were polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polyamide (PA), with fibers and fragments being the predominant forms. The review emphasizes the need for methodological standardization and the use of advanced technologies such as μ FTIR and μ Raman spectroscopy for precise MP characterization. The case study in Maricá involved collecting samples from 126 wells distributed across nine zones within the municipality, following strict protocols to prevent external contamination. Mps were retained using cellulose acetate membranes (0.45 μ m) and analyzed under high-precision microscopy. Plastic particles were detected in 94 out of the 126 wells, with concentrations ranging from 13 to 63 items/L. The majority of the identified particles (96.4%) were fibers, predominantly blue. In terms of size distribution, 41.3% were classified as microplastics, while 58.7% were categorized as meso- and macroplastics. Among the 45 samples analyzed using μ FTIR spectroscopy, 40% of the particles were cellulose, while PE accounted for 15.9%, followed by PA, PET, and PS (9.1% each). Presence of Mps in the region is likely associated with factors such as inadequate sanitation infrastructure, high soil permeability, and hydraulic connectivity between aquifers, lagoons, and the ocean. The findings of this thesis not only contribute to a better understanding of MP contamination in groundwater but also highlight the urgent need for public policies to mitigate this pollution. Measures such as proper plastic waste disposal and strategies for aquifer protection are essential to ensuring the quality of groundwater resources.

Keywords: Microplastics, Groundwater, Plastic Pollution, μ FTIR Spectroscopy, Literature review.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de poços comumente encontrados no Brasil (adaptado de ABAS, (?))	16
Figura 2 - Mapa de densidade populacional e ocupação humana do município de Maricá – RJ. (Baseado nos dados do Censo Demográfico 2010 do IBGE).	23
Figura 3 - Mapa das zonas de estudo no município de Maricá e entorno (Baseado em dados do IBGE, ANA, 2025).	27
Figura 4 - Momento de coleta da água de poço.	30
Figura 5 - Processo de caracterização das amostras: (a) filtragem da água; (b) armazenamento das amostras filtradas em placa de Petri identificadas; (c) Microscópio Olympus SZX16; (d) imagem gerada pelo microscópio SZX16.	31
Figura 6 - Aplicação do formulário ao residente no dia da coleta.	32
Figura 7 - Formulário aplicado para cada residente.	33
Figura 8 - Amostra sendo processada no microFTIR, pertencente ao Laboratório de Caracterização Instrumental do Instituto de Química da UERJ.	33
Figura 9 - Tendência de publicações sobre microplástico em águas subterrâneas a partir de 2014.	39
Figura 10 - Número de publicações realizadas por países nos últimos dez anos.	40
Figura 11 - Quantidade de publicações pelos principais autores dos últimos dez anos.	40
Figura 12 - Gráfico de representação dos meets entre palavras chaves de estudos realizados sobre Mps em águas subterrâneas pelo mundo.	42
Figura 13 - Composição dos Mps encontrados nos artigos de estudo em todos o mundo.	43
Figura 14 - Número de Publicações na América Latina	45
Figura 15 - Mapa de densidade populacional e ocupação humana do município de Maricá – RJ. (Baseado nos dados do Censo Demográfico 2010 do IBGE).	59
Figura 16 - Mapa das zonas de estudo no município de Maricá e entorno (Baseado em dados do IBGE, ANA, 2025).	61
Figura 17 - Abundância de plástico detritos nas águas subterrâneas por zona amostrada, em Maricá (Rio de Janeiro, Brasil) (**: Medianas acima das demais; A: Quantidade acima dos demais).	64
Figura 18 - Descarte final de doméstico esgoto baseado sobre dados obtidos através o questionário.	66
Figura 19 - Representativo fotografico de detritos plástico (fibras e fragmentos) identificados em águas subterrâneas , Maricá (Rio de Janeiro, Brasil).	70

Figura 20 - Tipos de microplásticos encontrados nas zonas amostradas. _____	71
Figura 21 - Variedade de detritos plástico cores por zonas amostradas. _____	72
Figura 22 - Tamanho distribuição de detritos plástico por zonas amostradas. _____	73
Figura 23 - Porcentagem representação de partícula tipos identificados através da análise μ FTIR. _____	74

Sumário

1	Introdução.....	12
2	Revisão Bibliográfica	14
2.1	Águas Subterrâneas	14
2.2	Tipos de Aquíferos	15
2.3	Tipos de poços	15
2.4	Leis em Vigor	17
2.5	Microplástico	18
2.6	Microplásticos em Águas Subterrâneas.....	20
3	Objetivo Geral	22
3.1	Objetivos Específicos	22
4	Área de Estudo	22
4.1	Maricá.....	22
4.2	Potencial Hidrogeológico	24
4.3	Hidrodinâmica	24
4.4	Clima	25
4.5	Atividade antropogênica.....	25
5	Materiais e Métodos	26
5.1	Pesquisa bibliográfica.....	26
5.2	Distribuição de pontos	27
5.2.1	Coletas, filtração e caracterização de resíduos plásticos	29
6	Resultados.....	34
6.1.	CAPÍTULO 1 –	35
6.2.	CAPÍTULO 2 –	57
7	Considerações Finais	84
8	Referência.....	86
9	Anexo I – Tabela com os 127 artigos filtrados da pesquisa avançada do Scopus 96	

1 Introdução

O plástico é um dos materiais mais utilizados na sociedade moderna devido às suas propriedades versáteis, como resistência térmica, estabilidade química, maleabilidade e baixo custo. Essas características os tornam indispensável em diversos setores industriais, desde a produção de embalagens e utensílios domésticos até aplicações na medicina e engenharia (Almeida *et al.*, 2023). No entanto, sua ampla utilização também resultou em um problema ambiental significativo: a poluição por plásticos e seus derivados, incluindo os microplásticos (Mps).

Desde a década de 1950, a produção global de plásticos tem crescido exponencialmente, ultrapassando 400 milhões de toneladas anuais em 2019 (Ritchie & Roser, 2023 Zhang *et al.*, 2022). Apesar da crescente conscientização ambiental, a taxa de reciclagem ainda é baixa, e uma grande quantidade de resíduos plásticos é descartada de forma inadequada, persistindo no meio ambiente por longos períodos. Com o tempo, processos naturais como intemperismo, radiação UV, ação mecânica das ondas e vento fragmentam esses resíduos, formando partículas menores denominadas Mps, com dimensões inferiores a 5 mm (Cole *et al.*, 2011).

A contaminação por Mps tem sido amplamente estudada em ambientes marinhos e águas superficiais, onde sua presença foi relatada pela primeira vez na década de 1970 (Carpenter & Smith, 1972). Desde então, pesquisas revelaram a ampla disseminação dessas partículas em diferentes compartimentos ambientais, incluindo o ar, solos e até mesmo tecidos biológicos de organismos marinhos e terrestres (Zolotova *et al.*, 2022; Jeong *et al.*, 2024; Parker *et al.*, 2023). A ingestão e inalação dessas partículas têm levantado preocupações sobre seus efeitos na saúde humana. Estudos recentes detectaram a presença de Mps no trato gastrointestinal (Criado, 2018), sistema respiratório (Prata, 2018), corrente sanguínea (Leslie *et al.*, 2022) e até mesmo em placentas humanas (Ragusa *et al.*, 2021), o que sugere um potencial toxicidade sistêmica.

Entretanto, apesar do crescente número de estudos sobre Mps em ecossistemas aquáticos, a contaminação de águas subterrâneas ainda é um tema pouco explorado. As águas subterrâneas representam uma das principais fontes de abastecimento de água potável para milhões de pessoas em todo o mundo e são vulneráveis à infiltração de contaminantes provenientes de atividades antrópicas, como descarte inadequado de resíduos sólidos, escoamento superficial, infiltração de efluentes industriais e lixiviados

de aterros sanitários (Chia *et al.*, 2021). A revisão de Viaroli *et al.* (2022) enfatiza que a presença de Mps nos aquíferos pode comprometer a qualidade da água subterrânea, uma vez que essas partículas podem atuar como vetores de poluentes orgânicos persistentes e metais pesados, aumentando os riscos ambientais e à saúde humana.

A contaminação por Mps em aquíferos já foi confirmada em diferentes partes do mundo, incluindo Noruega, Suécia, Estados Unidos, China e África do Sul (Shockley, Lapworth, 2022). No entanto, muitos desses estudos são limitados em escopo, com amostras restritas a locais isolados, sem considerar fatores como densidade populacional e infraestrutura de saneamento básico, que podem influenciar significativamente os níveis de contaminação (Panno *et al.*, 2019; Esfandiari *et al.*, 2022). A escassez de dados sistemáticos e a ausência de padronização nos métodos de coleta e análise dificultam a compreensão real da distribuição e do impacto dos Mps nas águas subterrâneas, tornando este um problema ambiental emergente e subestimado.

Além da dificuldade de rastrear e quantificar Mps em aquíferos, sua presença também levanta preocupações sobre a possível bioacumulação e biomagnificação desses poluentes na cadeia alimentar. Mps podem adsorver substâncias químicas tóxicas, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) e bifenilos policlorados (PCBs), funcionando como vetores para a disseminação desses compostos nocivos (Rochman *et al.*, 2013; CORSI *et al.*, 2022). Dessa forma, a ingestão de Mps contaminados por organismos aquáticos ou a sua presença em águas de consumo humano pode representar riscos ainda não completamente elucidados para a saúde pública.

Um aspecto preocupante é a interação dos Mps com microrganismos no solo e nas águas subterrâneas. Pesquisas indicam que essas partículas podem servir de base para comunidades microbianas, promovendo o crescimento de biofilmes que contêm patógenos e genes resistentes a antibióticos (Wang *et al.*, 2017). Isso sugere que os Mps podem não apenas deteriorar a qualidade das águas subterrâneas, mas também representar novos desafios à saúde pública, como o aumento da resistência bacteriana a tratamentos comuns.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Águas Subterrâneas

As águas subterrâneas são vitais para o fornecimento de água global, embora sua importância frequentemente não seja reconhecida. Elas são cruciais em áreas com fontes superficiais escassas ou inadequadas para consumo humano. Além de fornecer água potável, as águas subterrâneas sustentam ecossistemas naturais, alimentando nascentes, aquíferos e zonas úmidas, e são essenciais para a agricultura, especialmente na irrigação (Scanlon *et al.*, 2023; Mace, 2023).

O deslocamento das águas subterrâneas é um processo vagaroso que ocorre através dos poros e fissuras das rochas, movendo-se do ponto de maior pressão para o de menor, conforme a Lei de Darcy, que relaciona a vazão de água à permeabilidade do meio (Manziona, 2015). A velocidade desse movimento depende de diversos fatores, sendo a condutividade hidráulica a mais importante. Isso está relacionado às propriedades do meio poroso, como o tamanho, forma e organização das partículas, além da porosidade e permeabilidade intrínseca (Feitosa *et al.*, 2008). Aspectos do próprio fluido, como viscosidade e densidade, também influenciam sua mobilidade (Feitosa *et al.*, 2008; Manziona, 2015). A recarga dos aquíferos é majoritariamente realizada pela infiltração da água da chuva, e é afetada por fatores como tipo de solo, cobertura vegetal e nível de urbanização (Shamsudduha *et al.*, 2011).

As águas subterrâneas, ao contrário das superficiais, são naturalmente protegidas contra evaporação e contaminação atmosférica, o que geralmente as torna mais limpas e menos propensas a poluentes externos (Mace, 2023). Contudo, elas ainda podem ser poluídas. Fontes de contaminação incluem o uso excessivo de fertilizantes e pesticidas na agricultura, infiltração de esgotos sem tratamento, resíduos industriais e derramamentos de produtos químicos (Lapworth *et al.*, 2017). A exploração excessiva dos aquíferos pode diminuir drasticamente os níveis de água, comprometendo o fornecimento e podendo causar subsidência do solo, onde a terra afunda devido à retirada excessiva de água (Konikow & Kendy, 2005). Regiões áridas e semiáridas são particularmente vulneráveis, pois longos períodos de seca dificultam a infiltração de água no solo, complicando sua recuperação (Taylor *et al.*, 2013).

Outra questão é a intrusão salina em aquíferos costeiros, que ocorre quando há retirada excessiva de água subterrânea em áreas próximas ao mar, permitindo a entrada de água salgada, tornando a água doce inadequada para consumo humano e agrícola.

Este fenômeno é observado em várias partes do mundo, especialmente em regiões densamente povoadas e com uso agrícola intensivo, segundo Werner *et al.* (2013).

A gestão sustentável das águas subterrâneas requer estratégias eficazes para monitorar sua qualidade e disponibilidade, além de políticas para o uso racional desses recursos. Medidas como proteger áreas de recarga e incentivar o uso de tecnologias mais eficientes nos setores agrícola e industrial são cruciais para a conservação desses reservatórios (Gleeson *et al.*, 2012). Além disso, expandir o acesso a sistemas de saneamento básico pode reduzir significativamente o risco de contaminação em águas subterrâneas (OMS, 2022).

2.2 Tipos de Aquíferos

Os aquíferos são formações geológicas com características específicas que permitem o armazenamento e a transferência de água. Devido à diversidade regional, o tipo de aquífero influencia diretamente a gestão e exploração dos recursos hídricos. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), destacam-se três tipos principais:

- **Aquíferos Porosos:** Presentes em rochas sedimentares, esses aquíferos consistem em espaços entre os grãos onde a água é armazenada, formando grandes reservatórios. Um exemplo notável é o aquífero Guarani.
- **Aquíferos de Fraturas e/ou Fissuras:** Formados em rochas ígneas, esses aquíferos são caracterizados pela presença de fraturas que contêm água, resultando em reservatórios de diversos tamanhos e capacidades de armazenamento.
- **Aquíferos Cársticos:** Encontrados em rochas carbonáticas, como calcário, esses aquíferos são moldados por processos de dissolução que resultam em formações como cavernas e rios subterrâneos, onde a água é armazenada em grandes quantidades.

2.3 Tipos de poços

Os poços são estruturas essenciais para a captação de água subterrânea e desempenham um papel fundamental no abastecimento de água para diversos fins, como consumo humano, agricultura e indústria.

No Brasil, a perfuração de poços artesianos é regulamentada por leis estaduais e federais para garantir a sustentabilidade e a proteção dos recursos hídricos. A Resolução

Conama nº 396/2008, por exemplo, define os critérios para a classificação e controle da qualidade das águas subterrâneas. Além disso, a perfuração e operação de poços devem ser autorizadas pelo órgão ambiental competente, geralmente a Agência Nacional de Águas (ANA) ou os órgãos estaduais de meio ambiente.

Existem diferentes tipos de poços (Figura 1), cada um com características específicas que os tornam adequados para determinadas condições geológicas e necessidades de uso. Segundo a ABAS – Associação brasileira das águas subterrâneas os tipos de poços mais comumente encontrados no Brasil incluem:

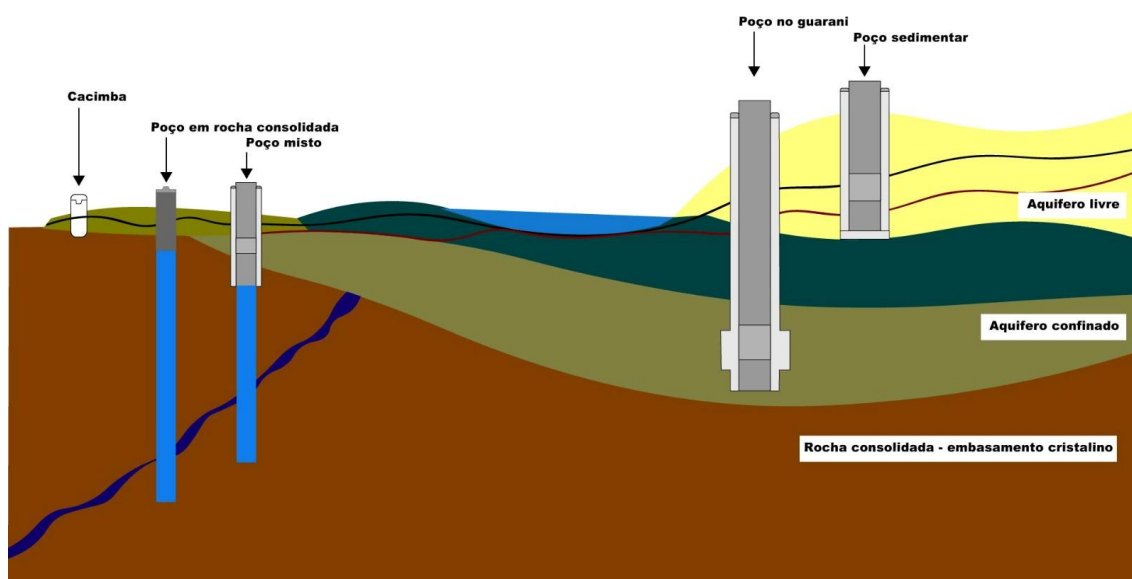


Figura 1 - Tipos de poços comumente encontrados no Brasil (adaptado de ABAS)

- **Cacimba, Poço Raso, Cisterna ou Poço Amazonas**
Construção: Manual
Licenciamento: Não necessita de licenciamento ou autorização governamental dos órgãos gestores.
- **Poço Perfurado em Rochas Consolidadas ou Cristalinas**
Conhecido como: Semi-artesiano
Características: Perfuração em rochas duras e estáveis.
- **Poço Perfurado em Rochas Inconsolidadas e Consolidadas**
Conhecido como: Poço Misto ou Semi-artesiano
Características: Perfuração em combinação de rochas soltas e duras.
- **Poço no Aquífero Guarani**
Tipo de rochas: Consolidadas e inconsolidadas
Dimensões: Grandes diâmetros (até 36”) e profundidades (até 1.500 metros)

Conhecido como: Artesiano, podendo ser jorrante ou não.

- **Poço Sedimentar**

Tipo de rochas: Geralmente inconsolidadas

Conhecido como: Semi-artesiano

2.4 Leis em Vigor

Para proteger os recursos hídricos, que são bens de domínio público, e garantir seu uso racional, foi estabelecida a Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

No Brasil, as leis vigentes que orientam o uso das águas subterrâneas incluem a Resolução CONAMA nº 396/2008, que trata da classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, a Resolução nº 357/2005, que aborda a classificação dos corpos de água e estabelece diretrizes para seu enquadramento e lançamento de efluentes, e a Portaria nº 2.914/2011, que define procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Embora a Resolução CONAMA nº 357/2005 trate principalmente da qualidade das águas superficiais, ela pode direcionar o conhecimento sobre a qualidade da água de modo geral. Sendo assim, de acordo com os parâmetros analisados as águas dos poços analisadas neste estudo podem ser classificadas como água doce Classe I, podendo ser destinadas ao consumo humano, irrigação de hortaliças, proteção de áreas indígenas, entre outros usos, após um tratamento simplificado.

Segundo a CONAMA nº 396/2008, as águas subterrâneas da região de Maricá podem ser classificadas como água subterrânea de classe IV, indicando uma alteração de sua qualidade por atividades humanas. Isso significa que, embora não seja necessária uma intervenção imediata devido a essas alterações, pode ser exigido um tratamento adequado dependendo do uso predominante, devido às características hidrogeológicas naturais.

Com base nessas leis, o objetivo é compreender a qualidade das águas subterrâneas na região de Maricá, analisando e comparando os parâmetros específicos de cada ponto. Isso permitirá identificar possíveis influências externas, como o descarte inadequado de efluentes, que podem resultar em contaminações cruzadas (quando a contaminação de um ambiente passa para outro ambiente).

2.5 Microplástico

As partículas plásticas podem ser classificadas em diferentes grupos de tamanho, o que influencia diretamente sua interação com o meio ambiente. Essas partículas variam de nanômetros a milímetros, abrangendo uma ampla faixa de grandeza (Koelmans *et al.*, 2020). As macropartículas, possuem dimensões superiores a 25 mm, enquanto as mesopartículas variam entre 5 mm e 25 mm, conforme a classificação adotada por Issac & Kandasubramanian, 2021 e Campoy & Beiras, 2019. Entretanto, as micropartículas e nanopartículas despertam especial preocupação na atualidade. Os Mps são definidos como partículas entre 1 µm e 5 mm, enquanto os nanoplásticos apresentam tamanhos entre 1 nm e 1 µm (Campoy & Beiras, 2019).

Tais partículas microscópicas podem se acumular no meio ambiente, afetando a fauna e a saúde humana de diversas maneiras. Nos ecossistemas, os Mps representam uma ameaça significativa para a vida animal, uma vez que sua ingestão pode causar disfunções intestinais, desnutrição, redução no crescimento e até a morte, como demonstrado por estudos da Universidade de São Paulo (Pompêo; Borges; Paiva, 2022). Além disso, a presença dessas partículas contribui para a redução da biodiversidade, impactando diretamente organismos aquáticos, como peixes e aves marinhas (Faria *et al.*, 2019).

Em relação à saúde humana, Mps e nanoplásticos já foram detectados no trato gastrointestinal (Criado, 2018), no sistema respiratório (Prata, 2018), na corrente sanguínea (Leslie *et al.*, 2022) e até mesmo em placentas humanas (Ragusa *et al.*, 2021). No entanto, embora essas descobertas evidenciem a presença dessas partículas no organismo humano, ainda não há um consenso sobre os impactos diretos que podem causar à saúde a longo prazo. Diante disso, a questão dos Mps não se configura apenas como um problema ambiental, mas também como um sério desafio para a saúde pública.

As fontes de contaminação por Mps são diversas. No ambiente aquático, esses contaminantes são introduzidos principalmente por descargas diretas de esgotos domésticos, escoamento de rodovias, efluentes industriais, atividades agrícolas e urbanização (Karbalaei *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017). Já no solo, a principal fonte de poluição decorre da deposição de resíduos sólidos urbanos ricos em materiais plásticos (Kumar, 2022).

Uma vez liberados no ambiente, os Mps podem ser transportados pelo vento e pela chuva para rios, lagos e oceanos. McCormick *et al.* (2016) documentaram sua presença em rios da cidade de Chicago (Illinois e Indiana), enquanto Sulistyowati *et al.* (2022) relataram sua ocorrência na bacia Cisadane, na Indonésia. No Brasil, Bertoldi (2022) identificou Mps em lagos, assim como Eriksen *et al.* (2013) nos Estados Unidos e Tanentzap *et al.* (2021) em lagos de grande relevância na Europa.

Nos oceanos, a contaminação por Mps é um problema amplamente documentado. Estudos recentes apontam sua presença em diferentes regiões marinhas do mundo: Gunaalan *et al.* (2023) analisaram sua distribuição no Mar de Kattegat e no Skagerrak, na Dinamarca; Guerrini *et al.* (2023) relataram altas concentrações no Mar Mediterrâneo; e Olivatto *et al.* (2019) registraram sua presença na Baía de Guanabara, Brasil.

A caracterização dos Mps é uma etapa essencial para entender a dinâmica desses contaminantes no ambiente, especialmente em relação à sua origem, comportamento e aos impactos que podem causar. Um dos primeiros aspectos estudados é o tipo de Mps, ou seja, sua forma física, como fibras, fragmentos, filmes, esferas ou pellets. Essa distinção é importante porque diferentes morfologias estão associadas a fontes específicas (Andrady, 2011). Por exemplo, fibras geralmente vêm do desgaste de tecidos sintéticos durante lavagens, enquanto fragmentos são produtos da degradação de plásticos maiores. Conhecer essa origem ajuda a direcionar estratégias de controle e mitigação mais eficazes (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012).

Outro ponto comumente analisado pela comunidade científica é a classificação dos Mps pela sua cor. Embora possa parecer um dado meramente visual, a coloração influencia tanto a degradação quanto a interação com os organismos aquáticos (Rochman *et al.*, 2013). Mps com cores mais vivas podem absorver mais radiação solar, acelerando processos fotoquímicos de degradação, além de se tornarem visualmente mais atrativos para algumas espécies, o que aumenta a ingestão acidental (Imhof *et al.*, 2016).

O tamanho das partículas também é um aspecto crucial. Mps menores têm maior potencial de serem ingeridos por organismos em diferentes níveis tróficos, desde o zooplâncton até peixes e aves. Além disso, quanto menor a partícula, maior é sua área superficial em relação ao volume, o que aumenta sua capacidade de adsorver contaminantes presentes no ambiente, como metais pesados e compostos orgânicos persistentes (Wright *et al.*, 2013; Cole *et al.*, 2011).

Já a caracterização química dos Mps é fundamental para compreender sua toxicidade potencial, resistência à degradação e capacidade de interação com poluentes. Técnicas como espectroscopia FTIR ou Raman são frequentemente empregadas para essa finalidade. Polímeros diferentes, como polietileno (PE), polipropileno (PP) ou poliestireno (PS), apresentam comportamentos distintos no ambiente e podem liberar aditivos tóxicos com o tempo (Bhagat *et al.*, 2021; Frias & Nash, 2019).

Os Mps mais comuns encontrados no ambiente têm, em sua maioria, composições químicas baseadas em polímeros sintéticos amplamente utilizados no cotidiano. Entre os principais, destaco o PE, o PP, o PS, o polietileno tereftalato (PET) e o policloreto de vinila (PVC). O PE, tanto de baixa quanto de alta densidade, aparece com frequência em amostras ambientais devido ao seu uso massivo em embalagens, sacolas e filmes agrícolas (Andrady, 2011; Frias; Nash, 2019). Já o PP, presente em tampas de garrafas e tecidos, também é amplamente detectado, especialmente em ambientes aquáticos (Bhagat *et al.*, 2021). O PS, bastante comum em produtos descartáveis, e o PET, usado principalmente em garrafas e fibras têxteis, completam esse conjunto de polímeros recorrentes (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012). A predominância desses materiais não é aleatória, estando diretamente ligada ao volume de produção e à forma como são descartados.

Em relação às possíveis fontes, é importante considerar que os Mps encontrados no ambiente muitas vezes refletem práticas rotineiras e processos industriais. Fibras de PET e poliamida, por exemplo, têm forte ligação com a lavagem de roupas sintéticas, sendo liberadas por meio do esgoto doméstico (Cole *et al.*, 2011). Fragmentos de PE e PP, por sua vez, geralmente se originam da degradação de embalagens e objetos plásticos que foram descartados de maneira inadequada (Andrady, 2011). O PS é frequentemente associado a resíduos de bandejas de isopor e copos descartáveis (Bhagat *et al.*, 2021), enquanto o PVC, utilizado principalmente na construção civil, pode se acumular em áreas urbanas devido ao desgaste de tubos e revestimentos (GESAMP, 2015). Ao compreender essas composições e origens, torna-se possível propor estratégias de monitoramento e mitigação mais direcionadas, alinhadas com a realidade do uso e descarte desses materiais.

2.6 Microplásticos em Águas Subterrâneas

A ocorrência de Mps em águas subterrâneas está emergindo como um assunto relevante nos estudos sobre poluição ambiental, com consequências ainda não

totalmente esclarecidas. Embora a maioria das investigações sobre Mps tenha se concentrado em ambientes marinhos e de superfície, novas evidências mostram que essas partículas já foram encontradas em aquíferos de várias regiões, incluindo Noruega, Suécia, Estados Unidos, China e África do Sul (Shockley, Lapworth, 2022). Esse fato gera preocupações não só devido à contaminação direta das reservas de água subterrânea, essenciais para uma grande parcela da população mundial, mas também por possíveis efeitos na qualidade da água e nos ecossistemas que dependem dela.

Os Mps apresentam características que os tornam particularmente problemáticos no ambiente subterrâneo. Além de sua durabilidade e capacidade de movimento no solo, essas partículas podem servir como transportadores de contaminantes químicos, adsorvendo compostos orgânicos persistentes (COPs) como pesticidas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e metais pesados (Vieira *et al.*, 2021; Ibrahim *et al.*, 2019). Desta maneira, os Mps não só são considerados como um novo poluente no sistema hídrico, mas também facilitam a dispersão de substâncias tóxicas já existentes.

A mobilidade dessas partículas em águas subterrâneas é determinada por diversos processos físico-químicos, incluindo peneiramento, sedimentação e aglomeração, como explicado por Bradford, 2003; Goepfert & Goldscheider, 2019; Ngueleu *et al.*, 2013: O peneiramento acontece quando partículas menores atravessam os poros do solo, enquanto as maiores são filtradas. A sedimentação se refere à deposição de partículas, sendo mais relevante em áreas onde a velocidade do fluxo subterrâneo é mais lenta. A aglomeração envolve a união de partículas menores em estruturas maiores, o que pode alterar seu comportamento e diminuir sua mobilidade (Bradford, 2003; Goepfert & Goldscheider, 2019; Ngueleu *et al.*, 2013). Esses processos variam de acordo com as características do meio poroso, como o tamanho das partículas, permeabilidade e composição química, tornando a previsão do transporte de Mps um desafio científico importante.

Além dos aspectos físicos, as atividades humanas também desempenham um papel crucial na contaminação de águas subterrâneas por Mps. Ações como o descarte inadequado de plásticos, escoamento urbano, uso de lodo de esgoto em solos agrícolas e infiltração de efluentes industriais, por exemplo, são potenciais fontes desses poluentes (Eerkes-Medrano *et al.*, 2019). Em áreas densamente povoadas com infraestrutura sanitária deficiente, a contaminação cruzada de poços, devido à má gestão de fossas sépticas e à falta de sistemas eficientes de tratamento de esgoto, pode agravar significativamente a situação (Panno *et al.*, 2019; Esfandiari *et al.*, 2022).

Embora a pesquisa sobre Mps em águas subterrâneas ainda seja escassa, os estudos disponíveis sugerem que a presença dessas partículas não deve ser ignorada. A falta de dados abrangentes e a ausência de protocolos padronizados para detectar e quantificar Mps em aquíferos dificultam a avaliação precisa da extensão do problema. No entanto, considerando a importância das águas subterrâneas para o abastecimento humano e a sustentabilidade dos ecossistemas, é fundamental aprofundar as investigações nesse campo.

3 Objetivo Geral

Avaliar a ocorrência, distribuição espacial e composição dos Mps em águas subterrâneas do município de Maricá-RJ, para que se possa compreender o papel dos processos de contaminação, das possíveis fontes de entrada e as implicações ambientais desse poluente.

3.1 Objetivos Específicos

- I. Realizar uma revisão bibliográfica sobre a presença de Mps em águas subterrâneas, destacando os desafios e as lacunas no conhecimento para a América Latina.
- II. Analisar a distribuição espacial da contaminação por Mps nos aquíferos de Maricá-RJ, identificando padrões de ocorrência e possíveis fatores influenciadores.
- III. Caracterizar a composição química e morfológica de parte das partículas microplásticas encontradas, determinando os principais polímeros presentes e suas possíveis origens.

4 Área de Estudo

4.1 Maricá

A área de estudo está localizada na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, compreendida nas coordenadas 22° 55' 10" S e 42° 49' 07" O (Figura 2). O último censo (IBGE, 2024) apontou que a região conta com aproximadamente 211.986 habitantes com uma área territorial de 361,572 km².

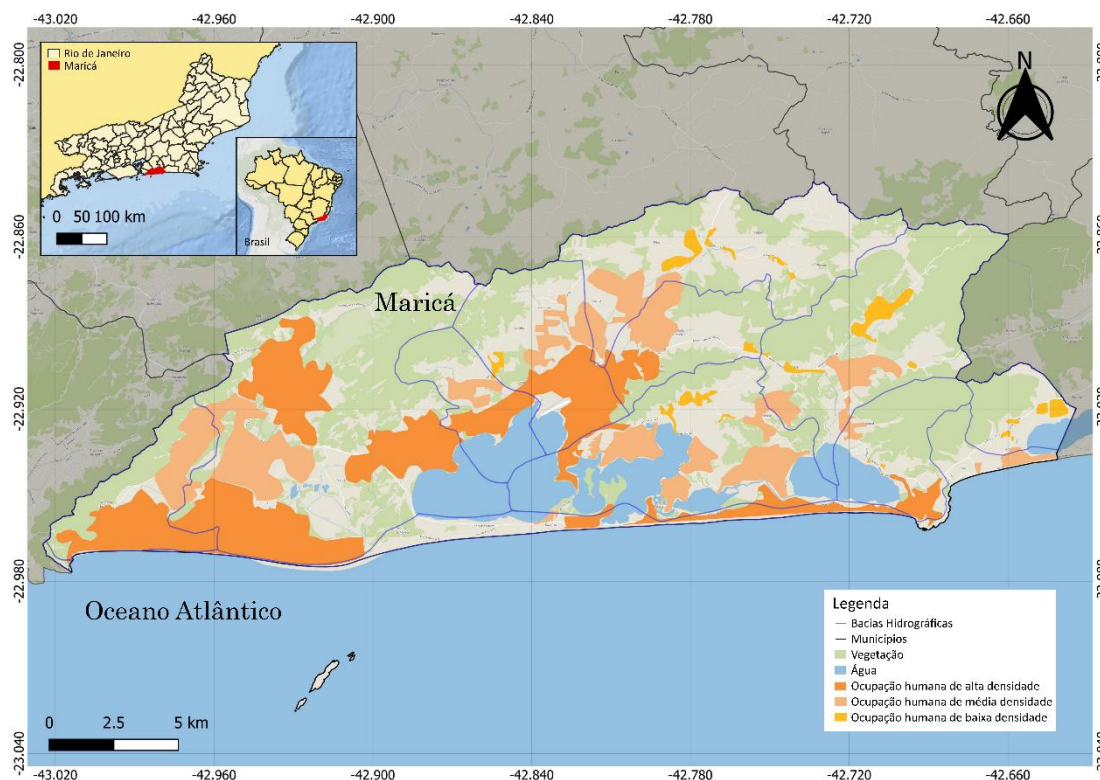


Figura 2 – Mapa de densidade populacional e ocupação humana do município de Maricá – RJ. (Baseado nos dados do Censo Demográfico 2010 do IBGE).

O uso e ocupação do solo em Maricá, têm passado por transformações significativas nas últimas décadas, impulsionadas pelo crescimento urbano e pela valorização imobiliária, especialmente nas áreas litorâneas e próximas às lagoas (Coyunji, 2013). Estudos indicam que, embora grande parte do território ainda seja composta por áreas de vegetação natural, como florestas e pastagens, há uma expansão urbana concentrada nos centros comerciais e litorâneos, pressionando ecossistemas sensíveis, como as restingas e áreas de proteção ambiental (Santos et al., 2017). A legislação municipal, por meio da Lei nº 2.272/2008, estabelece diretrizes para o uso, ocupação e parcelamento do solo, visando ordenar o crescimento urbano, preservar áreas ambientais e integrar comunidades carentes às zonas urbanas (Prefeitura de Maricá, 2008). Entretanto, desafios persistem, como a ocupação irregular de terras e a necessidade de conciliar o desenvolvimento urbano com a conservação ambiental.

Maricá abriga importantes áreas de preservação ambiental, destacando-se os ecossistemas de restinga que se estendem ao longo de sua faixa litorânea e desempenham funções ecológicas essenciais, como a proteção contra a erosão costeira, abrigo para fauna nativa e recarga de aquíferos. A Restinga de Maricá, inserida no bioma Mata Atlântica, é considerada uma das mais bem preservadas do estado do Rio

de Janeiro e abriga significativa biodiversidade, incluindo espécies endêmicas e ameaçadas de extinção. Estudos indicam que, apesar das pressões antrópicas, a vegetação nativa ainda se mantém em diversas áreas, ressaltando a importância de sua conservação (Santos *et al.*, 2017).

4.2 Potencial Hidrogeológico

Maricá se destaca pelo seu potencial hidrológico, influenciado pela sua geografia costeira e pela presença de uma série de lagoas e cursos d'água em seu território. As lagoas, como a de Maricá, de Itapeba e de Araçatiba, não apenas conferem beleza à paisagem local, mas desempenham um papel crucial na regulação do ciclo hidrológico da região (Silvestre *et al.*, 2017). Além disso, esses corpos d'água são importantes para a manutenção da biodiversidade, servindo como habitats para diversas espécies de flora e fauna.

O aquífero de Maricá é classificado como um sistema poroso, raso e altamente vulnerável à contaminação, principalmente devido à presença de sedimentos arenosos permeáveis, baixa declividade e proximidade com o nível do mar (Seabra *et al.*, 2008). Essas características conferem ao aquífero da região uma alta taxa de permeabilidade e armazenamento de água.

A geologia possui uma diversidade de formações que influenciam diretamente sua hidrografia. O município encontra-se numa região onde afloram rochas do embasamento cristalino, compostas principalmente por gnaisses e granitos, além de coberturas sedimentares mais recentes, associadas a depósitos aluvionares e formações quaternárias próximas à faixa costeira (Filho & da Silva., 2016). Essas características geológicas determinam a distribuição dos aquíferos locais e o comportamento do fluxo costeiro da água, influenciando diretamente a disponibilidade hídrica e a qualidade das águas subterrâneas.

Além disso, a proximidade com o mar e a existência de lagoas costeiras aumentam a vulnerabilidade à intrusão salina, uma especificidade que pode comprometer a qualidade da água subterrânea, especialmente em períodos de exploração intensiva dos recursos hídricos (De Almeida & Da Silva Junior, 2007).

4.3 Hidrodinâmica

De acordo com estudos conduzidos por Silva *et al.* (2018), a composição predominante do solo maricaense é caracterizada pela presença de grãos arenosos e argilosos, conferindo-lhe uma elevada permeabilidade que facilita o escoamento superficial da água. Ademais, aspectos climáticos, tais como a precipitação pluviométrica e a temperatura atmosférica, desempenham um papel determinante na dinâmica hídrica do solo.

Pesquisas conduzidas por Carvalho *et al.* (2014) indicaram que a quantidade de água infiltrada no solo apresenta uma relação direta com a diminuição da temperatura ambiente no município de Maricá. Tal fenômeno é atribuído à redução da taxa de evaporação da água presente no solo, favorecendo, conseqüentemente, o processo de infiltração. Acrescenta-se que o aumento na precipitação pluviométrica também figura como um fator determinante para a intensificação desse processo de infiltração hídrica no solo.

Pesquisas realizadas por Silva e Pereira em 2019 revelaram a existência de grandes reservatórios subterrâneos em Maricá, que podem ser utilizados para coletar água potável. Além disso, a infiltração de água no solo pode ser utilizada para irrigação, ajudando a diminuir a necessidade de outras fontes de água.

4.4 Clima

O clima predominante na região do MGLS varia entre tropical úmido e semiúmido, com temperatura média anual de aproximadamente 23 °C. A precipitação anual situa-se entre 1.100 e 1.500 mm. Esse regime climático é principalmente controlado pela atuação de massas de ar tropicais, tanto de origem oceânica quanto continental (Barroso-Vanacôr *et al.*, 1994 e Dos Santos, 2023).

As correntes marinhas geralmente em respostas aos ventos vindos do Sul são longitudinais oeste podendo haver também influência de ondas SE e SW conseqüentemente gerando correntes para Leste (Silva. *et al*, 2014). A maré é de sizígia e de amplitude geralmente inferior a 1,5 m (Cruz. *et al*, 1996).

4.5 Atividade antropogênica

Entre as décadas de 70 e 80, a cidade do Rio de Janeiro apresentava um crescimento exponencial, favorecendo o crescimento da região metropolitana e conseqüentemente nas vendas dos loteamentos da então conhecida “Vila de Maricá”. A

área foi desejada pelos emergentes cariocas da classe média afim de realizar construções de veraneio (Sochaczewski, 2004).

A pesca foi uma significativa fonte de renda nos anos 50, quando Maricá fornecia pescado à cidade do Rio de Janeiro. A comunidade pesqueira de Maricá, como descrita por Marco Antonio da Silva Mello em *Gente das Areias* (2004), representa um exemplo emblemático de resistência cultural e adaptação frente às transformações socioambientais ocorridas no litoral fluminense entre 1975 e 1995. Fortemente ligada às lagoas e ao mar, essa população desenvolveu um modo de vida baseado na pesca artesanal, transmitindo saberes tradicionais por gerações. No entanto, o avanço da urbanização, a especulação imobiliária e o descaso com o meio ambiente impactaram diretamente suas práticas cotidianas e sua relação com o território.

Atualmente, Maricá é um município, em grande parte, ocupado por residências, condomínios residenciais e comércio local, sem influência de grandes polos industriais. A partir de 2003, obteve um aumento expressivo com a venda de loteamentos na região (Holzer; Dos Santos, 2021) contando hoje, segundo o IBGE (2024), com cerca de 211.986 mil habitantes.

5 Materiais e Métodos

5.1 Pesquisa bibliográfica

Para a revisão, foi selecionado o banco de dados Scopus devido à sua abrangente capacidade de análise e rastreamento das tendências mais recentes sobre poluição por Mps em águas subterrâneas.

Para a pesquisa geral foi realizada uma busca bibliométrica avançada na base de dados Scopus em 12 de junho de 2024, utilizando o campo "TITLE-ABS-KEY". A string de consulta usada foi: `TITLE-ABS-KEY ("groundwater") AND ("plasticparticles")`, abrangendo publicações entre 2014 e 2024. Os artigos resultantes da pesquisa foram planilhados e podem ser acessados no Anexo I.

Para a pesquisa para a América Latina utilizou-se o mesmo espaço temporal com a seguinte pesquisa: TITLE-ABS-KEY ("microplastic*" OR "microplastics") AND TITLE-ABS-KEY ("groundwater" OR "aquifer*") AND TITLE-ABS-KEY ("Mexico" OR "Guatemala" OR "Belize" OR "El Salvador" OR "Honduras" OR "Nicaragua" OR "Costa Rica" OR "Panama" OR "Cuba" OR "DominicanRepublic" OR "Colombia" OR "Venezuela" OR "Ecuador" OR "Peru" OR "Bolivia" OR "Paraguay" OR "Chile" OR

"Argentina" OR "Uruguay" OR "Brazil") AND TITLE-ABS-KEY ("pollution" OR "contamination" OR "analysis" OR "study") AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025 AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")).

5.2 Distribuição de pontos

Quanto à pesquisa de campo nos poços de Maricá, para garantir uma amostragem representativa e abrangente, foram selecionadas 126 locais dentro da área de estudo, distribuídas em diferentes zonas de amostragem (Figura 3).

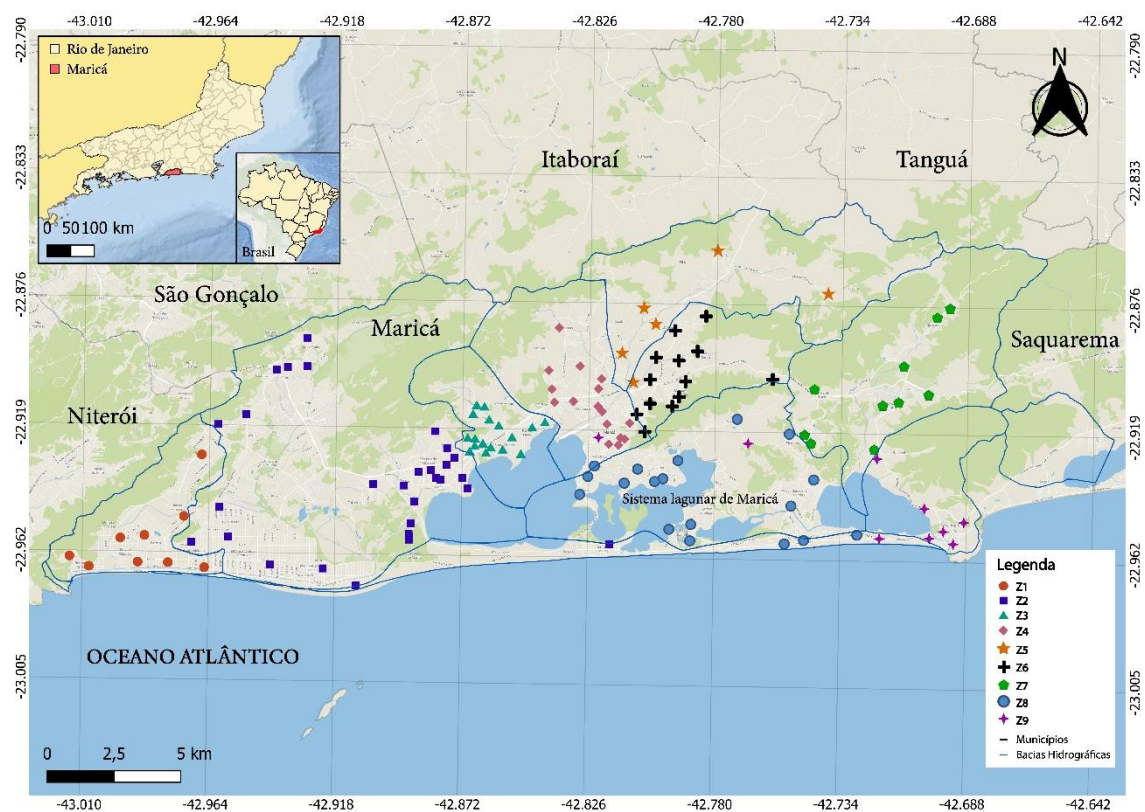


Figura 3 - Mapa das zonas de estudo no município de Maricá e entorno (Baseado em dados do IBGE, ANA, 2025).

A definição dessas zonas considerou os limites da sub-bacias hidrográfica local, porque os aquíferos subterrâneos estão diretamente conectados ao regime hidrológico da superfície, priorizando pontos estratégicos próximos a áreas potencialmente influenciadoras da qualidade da água subterrânea, como centros de saúde, postos de combustíveis, oficinas mecânicas, restaurantes, cemitérios e residências. Essa delimitação permite compreensão da dinâmica de infiltração da água e dos potenciais

caminhos de transporte de contaminantes, como os Mps, metais pesados e outros poluentes. A distribuição das zonas por bairros está decrita na Tabela 1 Tabela 1 - Apresentação das regiões que abragem cada zona. abaixo:

Tabela 1 - Apresentação das regiões que abragem cada zona.

Zonas	Quantidade de pontos	Bairros	Carcterísticas
Z1	9	Recanto de Itaipuaçu e Inoã	Essa zona abrange uma área predominantemente rural, mas que vem passando por crescimento urbano.
Z2	29	Itaipuaçu, Barroco, Jardim Atlântico Oeste, Jardim Atlântico Leste, Cajueiros	A maior zona de coleta está localizada na bacia do Rio Itapeba, que recebe contribuição de diversos corpos hídricos da região. Dos 31 pontos de coleta, quatro foram coletados dentro da Aldeia Mata Verde Bonita, uma comunidade indígena. Essa região é caracterizada por ocupação mista, com áreas urbanizadas e setores ainda preservados.
Z3	17	São José de Imbassai, Ponta Grossa e parque Nanci	Essa bacia hidrográfica inclui áreas urbanas de importância estratégica, como o entorno do Hospital Municipal Dr. Ernesto Che Guevara.
Z4	17	Centro, Mumbuca, Araçatiba, Pindobas	A região central da cidade de Maricá está inserida nessa bacia, caracterizada por alta densidade populacional e intensa atividade urbana. Devido ao alto grau de urbanização, apesar de haver rede de esgoto, ainda há maior potencial de contaminação das águas subterrâneas por esgoto doméstico e resíduos urbanos.
Z5	6	Caxito e Ubatiba	Essa zona apresenta baixa densidade populacional e áreas ainda preservadas, sendo de interesse para a comparação entre níveis de contaminação em ambientes menos impactados por atividades humanas.
Z6	11	Flamengo, Condado de Maricá e Marquês de Maricá	Essa bacia inclui regiões de baixa urbanização, mas que ainda podem sofrer influência da poluição difusa, oriunda de estradas e atividades agrícolas.
Z7	10	Espraiado, Manoel Ribeiro	Essa bacia apresenta densidade populacional moderada e está inserida em uma área de valor

			ecológico relevante.
Z8	20	Cordeirinho, Barra de Maricá, Bambuí, Jardim de Guaratiba, araçatiba e Jacaroá	Essa bacia hidrográfica apresenta significativa densidade populacional e forte influência antrópica.
Z9	7	Ponta Negra e Bananal	É uma zona caracterizada por densidade populacional mediana e uma forte interação com o sistema lagunar. A abertura da lagoa de Guarapina para o mar representa um fator importante para a dinâmica hídrica local.

De acordo com o Censo Demográfico de 2010 do IBGE, os bairros mais densamente povoados de Maricá, incluem Centro, Flamengo, Mumbuca, Araçatiba, Parque Nanci, Marquês de Maricá, Pindobas, Jardim Atlântico Oeste, Jardim Atlântico Leste e Praia de Itaipuaçu.

5.2.1 Coletas, filtração e caracterização de resíduos plásticos

A pesquisa sobre Mps em poços artesianos foi realizada durante o período de julho a dezembro de 2023, embora esse período tenha englobado duas estações do ano (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), não foram registrados eventos significativos de precipitação, nos dias que antecederam as coletas, que pudessem interferir nos resultados.

As amostras foram coletadas individualmente em garrafas de vidro âmbar de 1L, previamente rinsadas, pelo menos, três vezes com a água do poço para assegurar a ausência de contaminação da amostra (Figura 4).



Figura 4 - Momento de coleta da água de poço.

O tipo de coleta variou de acordo com o perfil de cada poço: ocorreu diretamente em torneiras ou mangueiras acopladas, através do lançamento do Van Dorn (equipamento para coleta de águas superficiais).

Após a coleta, as amostras foram encaminhadas para o laboratório de microplástico da projeto Lagoa Viva da CODEMAR, onde todo o volume das amostras foi filtrado, sendo submetido a um sistema de filtração a vácuo, com membranas de acetato de celulose de $0,45\ \mu\text{m}$, sendo, posteriormente, identificadas e colocadas em placas Petri, convenientemente lacradas para se evitar influências externas, como pode-se observar nas Figura 5 (a) e (b), abaixo.



Figura 5 – Processo de caracterização das amostras: (a) filtragem da água; (b) armazenamento das amostras filtradas em placa de Petri identificadas; (c) Microscópio Olympus SZX16; (d) imagem gerada pelo microscópio SZX16.

Em seguida, as amostras foram encaminhadas ao microscópio estereoscópico Olympus SZX16, com lupas de ampla proporção de Zoon, chegando a 16,4:1 (Figura 5, (C) e (d)). A observação minuciosa feita com o microscópio SZX16 permitiu que as características dos Mps fossem classificadas, seja em termos de quantidade, tamanho, cor ou ainda forma, conforme Brožová *et al.* (2023) e Şener & Yabanli (2023).

Um formulário foi confeccionado e apresentado aos residentes, proprietários de estabelecimentos comerciais e representantes de pontos da prefeitura, com o objetivo de se obter informações sobre a infraestrutura de saneamento, abastecimento de água, drenagem e qualidade de vida na região (Figura 6). O questionário utilizado, segue as diretrizes do Art.1 do Comitê de Ética em pesquisa [CEP], apresentando como primeira

pergunta a concordância do respondente em participar da pesquisa. Assim, por se caracterizar em uma pesquisa de opinião pública, onde os respondentes não são identificados, o questionário, assim como o estudo, está de acordo com a Resolução 510/2016 do CONEP, e dessa forma, não serão registradas nem avaliadas pelo Sistema CEP/CONEP.



Figura 6 - Aplicação do formulário ao residente no dia da coleta.

Os dados encontrados incluem aspectos como tempo de residência no bairro, nível de escolaridade e número de pessoas na residência, além de informações sobre o acesso à rede de esgoto, abastecimento de água e eventuais problemas enfrentados, como inundações e obstruções de vias por resíduos após a ocorrência de chuvas. O levantamento também investigou o uso de poços, possíveis problemas na qualidade da água e a percepção sobre odores encontrados. Além disso, foram analisados fatores relacionados à manutenção do saneamento pela prefeitura e à manifestação de doenças possivelmente relacionadas às condições ambientais, permitindo uma avaliação mais abrangente das condições sanitárias e seu impacto na saúde da população. A Figura 7 apresenta as perguntas realizadas.

Dados Pessoais							
Ponto	Nome	Endereço	Bairro	Telefone	Nível de Educação	Número de Pessoas na residência	Tempo que mora no bairro

Dados sobre água/esgoto/drenagem										
Possui Rede de Esgoto	Possui abastecimento de água	Problema com abastecimento de água	Possui pontos de inundação	Obstrução por lixo após a chuva nas ruas	Ação de Manutenção Estrutural pela prefeitura	Possui drenagem para água da chuva	A rua possui cheiro de esgoto	Local de esgoto	Frequencia limpeza da fossa	Frequencia limpeza da fossa

Dados sobre o poço			
Tipo de poço	Consome água de Poço	Alguma Observação na água do poço	Poços possuem mal cheiro

Dados sobre qualidade de vida	
Frequencia de Manifestação de doenças	Qualidade da Vida atestada pelo esgoto - doenças

Figura 7 - Formulário aplicado para cada residente.

A caracterização química dos resíduos sólidos filtrados foi realizada através de análise da espectroscopia do infravermelho com o auxílio de microFTIR Spectrum 3 com módulo Spotlight 200 (PerkinElmer) (Figura 8).

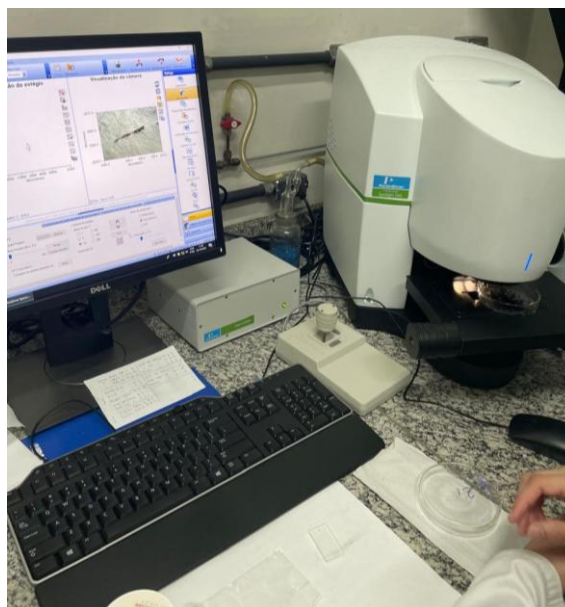


Figura 8 - Amostra sendo processada no microFTIR, pertencente ao Laboratório de Caracterização Instrumental do Instituto de Química da UERJ.

Os materiais filtrados foram transferidos para uma lâmina de KBr com o auxílio de uma lupa Olympus SZX10. O microFTIR foi configurado no modo de transmitância, utilizando uma resolução espectral de 1 cm^{-1} e uma faixa espectral de $4000 \text{ a } 600 \text{ cm}^{-1}$. O tamanho e o formato da abertura foram ajustados de acordo com cada amostra, com dimensões variando de $25 \text{ a } 150 \text{ }\mu\text{m}$. Os espectros obtidos foram comparados com a biblioteca de referência (Polymers) por meio do software PerkinElmer Spectrum IR (Versão 10.7.2), foram consideradas Mps as partículas cuja correspondência espectral com polímeros da biblioteca ultrapassou 60%.

6 Resultados

Os resultados e a discussão deste trabalho serão apresentados em capítulos, estruturados na forma de manuscritos e artigos submetidos em periódicos científicos.

CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS POR MICROPLÁSTICOS: UMA REVISÃO GLOBAL COM ÊNFASE EM ANÁLISES EMPÍRICAS E ESTUDOS NA AMÉRICA LATINA

Lara Luiza de Oliveira Pompermayer; Ana Dalva de Oliveira Santos; Danieli Lima da Cunha; Joel de Matos Junior; Khauê Silva Vieira; José Antonio Baptista Neto

OCORRÊNCIA DE MICRO E MACROPLÁSTICOS EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE MARICÁ (RIO DE JANEIRO – BRASIL)

Lara Luiza de Oliveira Pompermayer; Danieli Lima da Cunha; Joel de Matos Júnior; Diego Gomes de Carvalho; Luís Felipe da Silva Pinto Azeredo; Khauê Silva Vieira; Mônica Regina da Costa Marques Calderari; José Antonio Baptista Neto

6.1. CAPÍTULO 1 –

CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS POR MICROPLÁSTICOS: UMA REVISÃO GLOBAL COM ÊNFASE EM ANÁLISES EMPÍRICAS E ESTUDOS NA AMÉRICA LATINA

Lara Luiza de Oliveira Pompermayer; Ana Dalva de Oliveira Santos; Danieli Lima da Cunha;
Joel de Matos Junior; Khauê Silva Vieira; José Antonio Baptista Neto

Resumo

A presença de Mps em águas subterrâneas tem se tornado uma preocupação crescente devido à sua relevância ambiental e ao impacto na qualidade de recursos hídricos essenciais. Este estudo revisou 127 artigos publicados entre 2014 e 2024, com ênfase nas análises de Mps em águas subterrâneas, destacando lacunas regionais e metodológicas. Apenas 32 estudos realizaram coletas de águas subterrâneas, com predominância de análises em regiões como China, Índia e Coreia, enquanto a América Latina apresenta uma contribuição significativamente menor com um total de 7 artigos. Entre os polímeros mais identificados destacam-se polietileno (PE), polipropileno (PP) e poliamida (PA), sendo fibras e fragmentos os tipos mais recorrentes. Na América Latina, entre os 7 artigos, apenas dois analisaram diretamente amostras de águas subterrâneas. A revisão reforça a necessidade de padronização metodológica e ampliação de estudos regionais, bem como o desenvolvimento de estratégias que integrem tecnologias de análise avançada, como μ FTIR e μ Raman, para caracterização de Mps. A mitigação da contaminação exige políticas públicas voltadas para o descarte adequado de plásticos e a proteção estratégica de aquíferos subterrâneos.

Palavras-chave: Microplásticos; Águas subterrâneas; América Latina.

Introdução

O plástico, amplamente utilizado nos tempos modernos, destaca-se por suas propriedades físicas adaptáveis a diversas faixas de temperatura, resistência a compostos químicos, maleabilidade e baixo custo, tornando-se uma matéria-prima essencial em vários setores industriais (Almeida *et al.*, 2023). A partir das décadas de 1950 e 1960, o consumo de polímeros intensificou-se devido ao desenvolvimento de novos materiais e à crescente demanda por embalagens, produtos descartáveis, equipamentos eletrônicos e outros itens. Desde então, a produção mundial de plástico tem aumentado consistentemente, refletindo sua utilização expandida em diversas indústrias (Zhang *et al.*, 2022). Em 2019, a produção global superou 368 milhões de toneladas, conforme dados de organizações internacionais como a PlasticsEurope e a

Associação Internacional de Produtores de Plástico (APLA), (PlasticsEurope, 2019; Walker & Fequet, 2023). No entanto, essa elevada produção e uso resultaram em um aumento significativo na geração de resíduos plásticos, dos quais apenas uma pequena porcentagem é reciclada (Geyer *et al.*, 2017).

A presença persistente de plásticos no ambiente tornou-se um tema de pesquisa global devido aos impactos negativos nos ecossistemas terrestres e marinhos (Pan *et al.*, 2023; Kooiet *al.*, 2017). A primeira detecção de pequenos detritos plásticos nos oceanos ocorreu na década de 1970 (Carpenter & Smith, 1972). Esses fragmentos, grânulos e fibras foram denominados "microplásticos" (Mps). Para padronizar a classificação desses detritos, adotou-se a categorização de Kim *et al.* (2020): macroplásticos (>25 mm), mesoplásticos (5–25 mm), Mps grandes (1–5 mm), Mps pequenos (1 µm–1 mm) e nanoplásticos (<1 µm) (Kim *et al.*, 2020). Os Mps podem ser primários, fabricados na forma de pequenas partículas para uso direto em produtos, ou secundários, resultantes da degradação de materiais plásticos maiores (Issac & Kandasubramanian, 2021).

Pesquisas mostram que os plásticos afetam amplamente a fauna, pois quando ingeridas podem causar bloqueios metabólicos, danos físicos, redução do apetite, alteração do comportamento alimentar e fadiga (Zolotova *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2021; Jeong *et al.*, 2024; Albazoniet *al.*, 2024). Além disso, podem ser bioacumulados e biomagnificados na cadeia trófica. Estudos recentes também detectaram micro e nanopartículas de plástico no trato intestinal, sistema respiratório, corrente sanguínea e até em placentas humanas (Lee *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023; Campanale *et al.*, 2020; Parker *et al.*, 2023), embora os impactos na saúde humana ainda sejam pouco compreendidos.

Os detritos plásticos podem adsorver contaminantes como poluentes orgânicos persistentes e metais pesados, tornando-se veículos de efeitos negativos no crescimento, desenvolvimento e reprodução de organismos (Cole *et al.*, 2015; Osman *et al.*, 2023; Abgoola & Benson, 2021; Rochman *et al.*, 2019). Além disso, os Mps podem transferir microrganismos patogênicos entre diferentes locais, como demonstrado por Migwiet *al.* (2023). No estuário do Yangtze, por exemplo, a presença de bactérias patogênicas em Mps foi confirmada (Jiang, 2018).

Embora a contaminação por plásticos seja mais visível nos oceanos e corpos d'água superficiais, sua presença em águas subterrâneas é uma preocupação emergente,

podendo afetar significativamente os ecossistemas e a qualidade da água potável (Viaroli *et al.*, 2022). Desse modo, o presente estudo objetivou realizar um estudo bibliométrico, utilizando a base de dados científica Scopus, considerando artigos e revisões publicados entre 2014 e 2024.

Materiais e métodos

Para a realização da pesquisa, foi selecionado o banco de dados Scopus devido à sua abrangente capacidade de análise e rastreamento das tendências mais recentes sobre poluição por Mps em águas subterrâneas. O Scopus oferece uma cobertura de literatura científica, permitindo explorar diferentes temas, como hidrogeologia, hidrogeoquímica e ciência ambiental, o que possibilita uma visão aprofundada e multidisciplinar sobre diferentes áreas do conhecimento. Esse recurso garante a inclusão de publicações científicas de alta relevância e importância, fornecendo uma base sólida para a análise dos impactos ambientais e o avanço nas soluções para mitigação de contaminações nesse ecossistema.

Para a pesquisa geral foi realizada uma busca bibliométrica avançada na base de dados Scopus em 12 de junho de 2024, utilizando o campo "TITLE-ABS-KEY". A string de consulta usada foi: `TITLE-ABS-KEY ("groundwater") AND ("plasticparticles")`, abrangendo documentos datados entre 2014 e 2024.

Para a pesquisa para a América Latina utilizou-se o mesmo espaço temporal com a seguinte pesquisa: TITLE-ABS-KEY ("microplastic*" OR "microplastics") AND TITLE-ABS-KEY ("groundwater" OR "aquifer*") AND TITLE-ABS-KEY ("Mexico" OR "Guatemala" OR "Belize" OR "El Salvador" OR "Honduras" OR "Nicaragua" OR "Costa Rica" OR "Panama" OR "Cuba" OR "DominicanRepublic" OR "Colombia" OR "Venezuela" OR "Ecuador" OR "Peru" OR "Bolivia" OR "Paraguay" OR "Chile" OR "Argentina" OR "Uruguay" OR "Brazil") AND TITLE-ABS-KEY ("pollution" OR "contamination" OR "analysis" OR "study") AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025 AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")).

Com os resultados das buscas, foram produzidas tabelas das dez principais classificações de autores, instituições, países e fontes, que foram organizadas com base

na frequência de documentos, e em ordem alfabética quando necessário. Para as dez principais fontes, foram consultados o índice h, o quartil e o fator de impacto dos periódicos online.

Resultados e Discussão

A base de dados Scopus forneceu fontes de pesquisas publicadas, classificadas por autores, instituições, países, fontes, áreas temáticas, patrocinadores e tipo de documento. Inicialmente, foram encontrados 160 documentos. Após uma filtragem detalhada dos títulos e temas principais, a seleção final consistiu em 127 artigos (Anexo I). O conjunto de 127 artigos restantes abrangeu publicações do tipo artigos baseados em pesquisas empíricas (71%) e revisões bibliográficas (28%), todos filtrados para o idioma inglês.

A análise das publicações nas últimas décadas permitiu observar que apesar do crescimento exponencial dos estudos relacionados ao tema nos últimos quatro anos (Figura 9), a quantidade de análises sobre a poluição por Mps em águas subterrâneas ainda é consideravelmente inferior quando comparada a outros ambientes, como oceanos, águas superficiais, solo e ar (XU, Junet *al.*, 2023; LIU, Zhongchuanget *al.*, 2023; SONG, Zefengget *al.*, 2019). Esse fato pode ser atribuído a quatro fatores principais: primeiro, as partículas de Mps são frequentemente difíceis de visualizar a olho nu, tornando-as difíceis de identificar; segundo, elas não causam alterações perceptíveis na cor, sabor ou odor da água; e terceiro, as águas subterrâneas estão fora da vista cotidiana da maioria da população, o que pode gerar uma ilusória sensação de segurança, e por fim em quarto, o maior custo e a complexidade para a realização de estudos voltados para a contaminação de Mps em águas subterrâneas. Além disso, a gestão governamental tende a subvalorizar a importância das águas subterrâneas, resultando em menos investimentos e pesquisas nesse campo. A falta de padronização nos métodos de coleta e análise refletem essa falta de atenção e subestimação do impacto ambiental e de saúde pública da poluição por Mps nesse meio (KOELMANS, *et al.*, 2019; EERKES-MEDRANO, THOMPSON, ALDRIDGE., 2015).

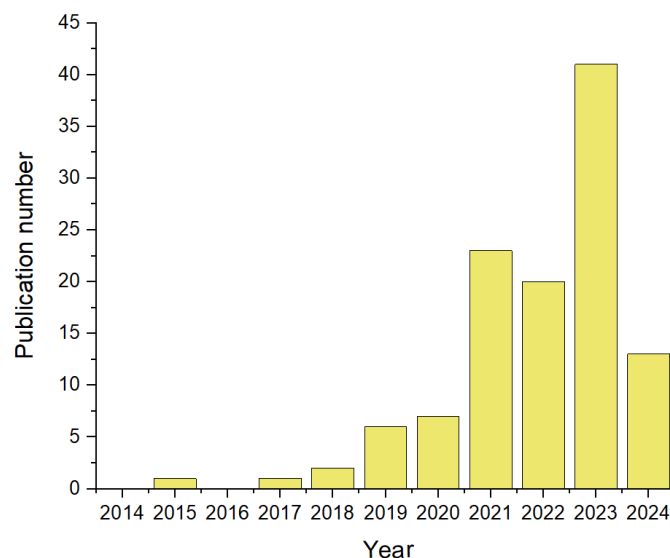


Figura 9 - Tendência de publicações sobre microplástico em águas subterrâneas a partir de 2014.

Nos dados de publicações por países (Figura 10), destaca-se o número expressivo de publicações científicas originadas na China, que representa 44% do total, seguido pela Índia, com 17,7%, e pelos Estados Unidos, com 11%. Esses três países, além de serem grandes potências globais, possuem altas densidades populacionais, o que pode estar diretamente relacionado ao interesse pelo tema de poluição por Mps.

A produção e consumo de plástico em países com maiores densidades populacionais é mais extensiva e podem aumentar as chances de descarte inadequado e, consequentemente, a liberação de Mps no meio ambiente (Lee *et al.*, 2023). Além disso, chama a atenção a escassez de estudos em regiões como o Sul da Ásia, África e América do Sul, áreas em desenvolvimento onde, apesar do potencial para altos níveis de consumo de plástico e geração de Mps, a falta de pesquisas pode dificultar soluções adequadas para o problema.

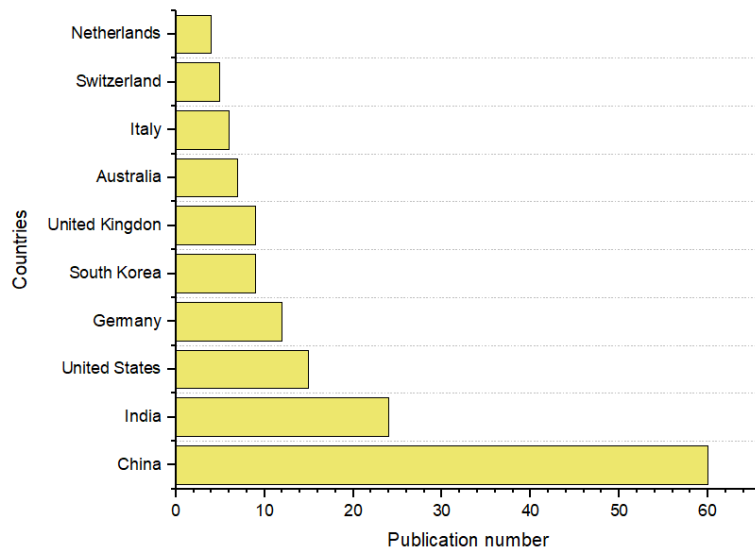


Figura 10 - Número de publicações realizadas por países nos últimos dez anos.

O primeiro artigo publicado sobre o tema foi de autoria de Geissen, Violette *et al* em março de 2015, e abordava a dificuldade da gestão de recursos hídricos, quando se tratava de poluentes emergentes, entre eles os Mps, que se encontravam em total desconhecimento na época. Entre os autores que mais publicaram sobre o tema, destaca-se Jin-Yong Lee, com mais de cinco artigos (Figura 11), dentre eles uma revisão (Chia, *et al*, 2022) e quatro artigos voltados para a contaminação de águas subterrâneas por Mps, como em áreas agrícolas (Cha., Lee., Lee., 2024; Cha., Lee., Chia., 2023), rurais (Jeong, *et al*. 2023) e também uma ilha vulcânica (Kim, *et al*, 2023).

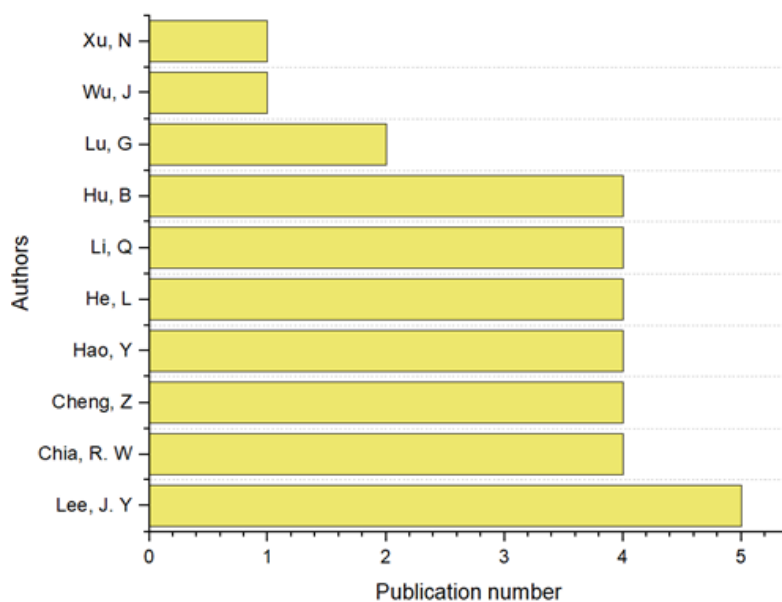


Figura 11 - Quantidade de publicações pelos principais autores dos últimos dez anos.

Entre os estudos analisados na pesquisa a Figura 12 exibe um gráfico de meets gerado no VOSviewer, representando as palavras mais utilizadas entre os autores nas palavras-chave, as palavras que mais se destacaram foram "partículas plásticas" e "água subterrânea". A análise foi realizada com um filtro para um mínimo de três ocorrências, resultando em 3.328 termos e 530 conexões, das quais 318 foram selecionadas e os círculos maiores representam as palavras mais utilizadas e as linhas das mesmas cores, suas conexões. Assim, na revisão dos 127 artigos da base de dados Scopus, o termo "partículas plásticas" mostrou-se especificamente relacionado a temas como “água de beber” (Bäuerleinet *al.*, 2022; Eerkes-Medranoet *al.*, 2019; Koelmanset *al.*, 2019; laCecilia *et al.*, 2024; Mauriziet *al.*, 2023; Oladoja&Unuabonah, 2021; Sangkhamet *al.*, 2023) associados ao consumo humano.

Outros termos importantes incluem “humano” (AT *et al.*, 2024; Gunarathneet *al.*, 2024; Mora *et al.*, 2021; Sangkhamet *al.*, 2023), apresentando preocupação crescente sobre os efeitos dos Mps na saúde humana, além de “solo para agricultura” (Chaet *al.*, 2023, 2024; King *et al.*, 2023; Loftyet *al.*, 2022) e “lodo” (Gao *et al.*, 2020; Hajjiet *al.*, 2023; Loftyet *al.*, 2022) , mostrando que os Mps estão abundantemente presentes em solos agrícolas e resíduos, com potencial para impactar a cadeia alimentar e a qualidade do solo. A conexão com “contaminação de água subterrânea” (Chaet *al.*, 2023; Jeong *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2023; Purushothamanet *al.*, 2023; Samandraet *al.*, 2022; Viaroliet *al.*, 2022) corrobora com o entendimento de que essas partículas têm a capacidade de infiltrar e se dispersar em sistemas de água subterrâneos, trazendo implicações para a contaminação de recursos hídricos submersos.

Por fim, a relação com “distribuição espacial” (K *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2024; Shu *et al.*, 2023) aponta para a relevância do estudo das características de distribuição dos Mps no ambiente, o que é essencial para entender seu comportamento e os mecanismos de transporte no solo e na água.

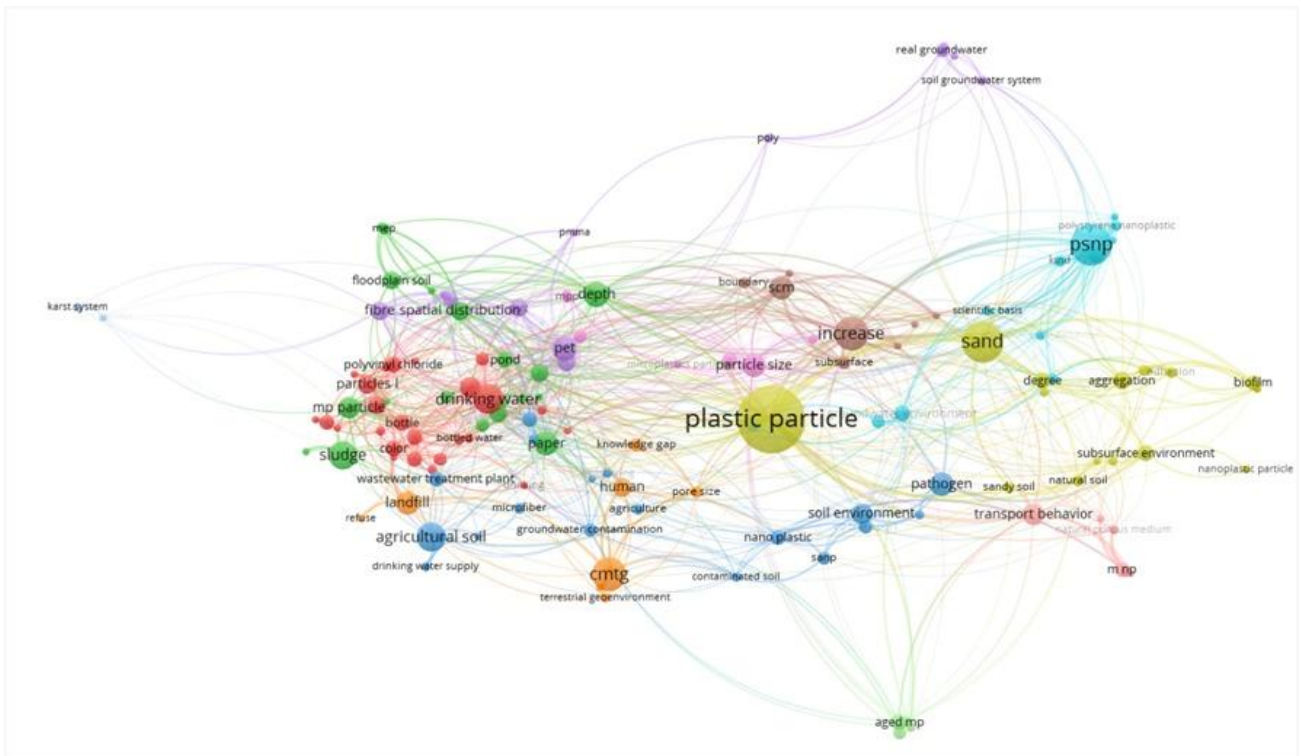


Figura 12 - Gráfico de representação dos meets entre palavras chaves de estudos realizados sobre Mps em águas subterrâneas pelo mundo.

Esses resultados exibem as multifaces da contaminação por partículas plásticas, englobando desde a distribuição espacial/transporte das partículas até as consequências para a saúde humana e para os ecossistemas, refletindo a importância de estudos da comunidade científica para a compreensão sobre essa contaminação.

Estudos de campo em águas subterrâneas

Dentre os 127 artigos que abordam a interação entre água subterrânea e Mps, apenas 32 realizaram estudos de campo onde amostras eram coletadas diretamente no ambiente e são esses estudos que vamos abordar. Assim sendo, a China é o país com o maior número de publicações, correspondendo a cerca de 28% do total, seguido pela Índia (22%) e Coreia (16%). Além disso, pelo menos 40,6% dos artigos utilizam a espectroscopia no infravermelho de Fourier (FTIR), para analisar a composição dos Mps, destacando o polipropileno (PP), polietileno (PE) e poliamida (PA) como os polímeros mais comuns nas amostras, conforme ilustrado na Figura 13. Em relação aos tipos de Mps, as fibras são frequentemente reportadas, aparecendo em 13 artigos como o tipo predominantemente, e a cor azul é a mais comum. Já para a diversidade de tamanho das partículas o estudo de Liu *et al.* (2022) apresentou partículas que variaram

significativamente entre 10 a 500 μm , enquanto Rahman *et al.* (2024) identificaram partículas maiores entre 0,01 mm a 5 mm.

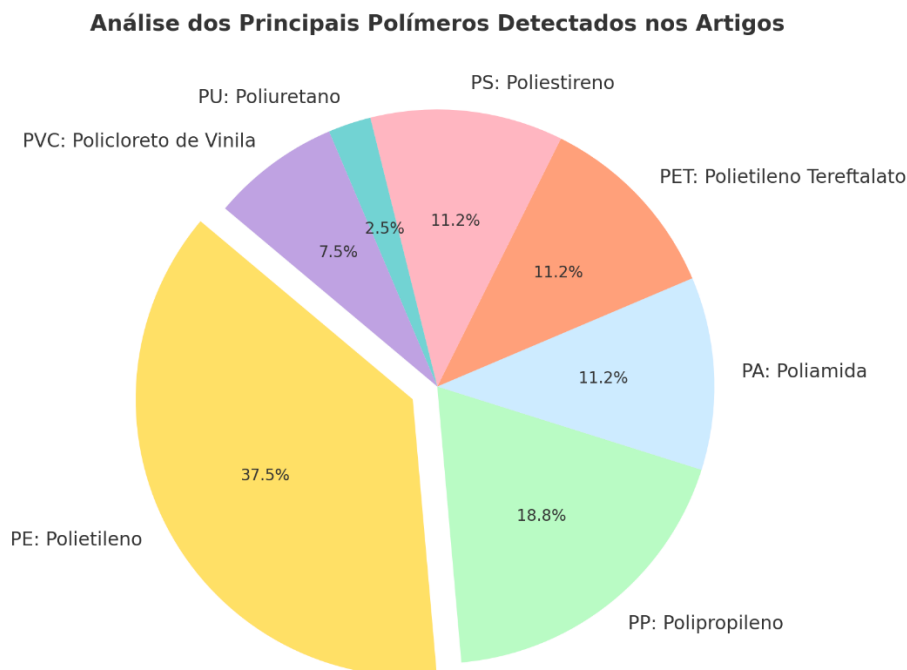


Figura 13 - Composição dos Mps encontrados nos artigos de estudo em todos o mundo.

Entre a quantidade de Mps e cores dos mesmos destacados na pesquisa, na Índia, por exemplo, Purushothaman *et al.* (2023) encontraram uma alta concentração de MPs no decorrer da sua área de estudo na costa sudoeste, amostras de sedimentos e águas subterrâneas coletadas nas áreas de estudo apontaram valores de $230,4 \pm 62,8$ Mps por 100g, predominando fibras azuis de PE, PP, PA, PS, EVA e PVC. Esse perfil sugere uma origem antropogênica, possivelmente ligada ao descarte inadequado de resíduos e à intrusão salina advindo do oceano. Pavithra *et al.* (2024) encontraram menores concentrações ($2,15 \pm 1,9$ Mps/L) em águas subterrâneas e de superfície em Tamil Nadu, onde a pandemia de COVID-19 intensificou o uso de plásticos específicos, agravando a poluição.

Na China, por sua vez, a contaminação por Mps se provou igualmente preocupante. Shu *et al.* (2023) analisaram a área cárstica do rio Yulong, em Guilin, e encontraram fibras de PP, PS e PET com tamanhos entre 3 e 80 μm , tanto em águas de superfície quanto subterrâneas. Wei *et al.* (2024) revelaram variações sazonais de Mps em águas subterrâneas da região cárstica de Huixian, com concentrações de 4,9 a 13,4 Mps/L, o que sugere a influência do clima e do ciclo hidrológico na dispersão destes poluentes.

Na Península de Jiaodong, Mu *et al.* (2022) detectaram 2.103 partículas/L de Mps, especialmente PET e PU, que diminuíram a contaminação de áreas urbanas e rurais, além de reservas naturais, com amplo transporte ambiental desses resíduos.

A Coreia apresentou contaminação por Mps em áreas agrícolas e vulcânicas. Chaet *et al.* (2023) identificaram fragmentos de PP, PE, PVC, PS e PA em águas agrícolas na Bacia de Haean, evidenciando o uso de águas contaminadas como vetor de Mps para o solo. Em Jeju, uma ilha vulcânica, Kim *et al.* (2023) encontrou fragmentos de 20 a 100 µm, compostos por PP, PE, PET, ABS e PU. Essas evidências podem indicar que atividades econômicas e fatores geográficos influenciam o tipo e a quantidade de Mps dispersos no meio ambiente.

Estudos na Europa e América do Norte também indicam a presença de Mps em águas subterrâneas. Na Itália, Balestra *et al.* (2023) identificaram concentrações de 12 a 54 Mps/L em sistemas cársticos, com predominância de fibras de PE abaixo de 1 mm. Nos Estados Unidos, Laramie *et al.* (2024) detectaram 11 Mps/L em áreas de biorretenção, principalmente fibras de PP e PE, indicando uma retenção limitada de Mps em sistemas de tratamento. Na Suíça, La Cecilia *et al.* (2024) observaram esferas azuis de PE mesmo após processos de tratamento e recarga de aquíferos, diminuindo que Mps que excedam camadas de filtração.

Em regiões como o Irã e Bangladesh, a presença de Mps nas águas subterrâneas preocupa pela inadequação no manejo de resíduos. Esfandiari *et al.* (2022) documentaram 0,48 Mps/L no aquífero de Shiraz, no sudoeste do Irã, com fibras de PE e PET menores que 500 µm. Em Bangladesh, Rahman *et al.* (2024) encontrou fragmentos de PP, PET, HDPE e LDPE em lixiviados de aterros, com tamanhos de 0,1 a 0,5 mm e concentração de 647 ± 22 Mps/L, representando um risco para ecossistemas aquáticos locais.

Esses estudos indicam que, quando associados a características geográficas, culturais e de consumo, os Mps apresentam uma ampla variação espacial e física nas águas subterrâneas ao redor do mundo. A padronização de metodologias de pesquisa, aliada ao uso de tecnologias avançadas, como µFTIR, e µRaman, é essencial para uma caracterização detalhada desses poluentes.

Estudos na América Latina

Uma revisão da literatura na base de dados Scopus revelou apenas sete artigos relacionados à contaminação por Mps em águas subterrâneas na América Latina, evidenciando uma lacuna significativa de pesquisas na região. As publicações estão distribuídas ao longo dos anos, com dois artigos publicados em 2024, três em 2023, um em 2021 e outro em 2019, sem registros no ano de 2020. O México foi o país que mais contribuiu, com quatro artigos, enquanto Equador, Colômbia e Brasil tiveram uma publicação cada (Figura 14). Apesar da relevância do tema, apenas dois estudos investigaram diretamente a presença de Mps em águas subterrâneas, enquanto os demais abordaram águas superficiais, sedimentos ou realizaram revisões mais amplas sobre o impacto desses poluentes.

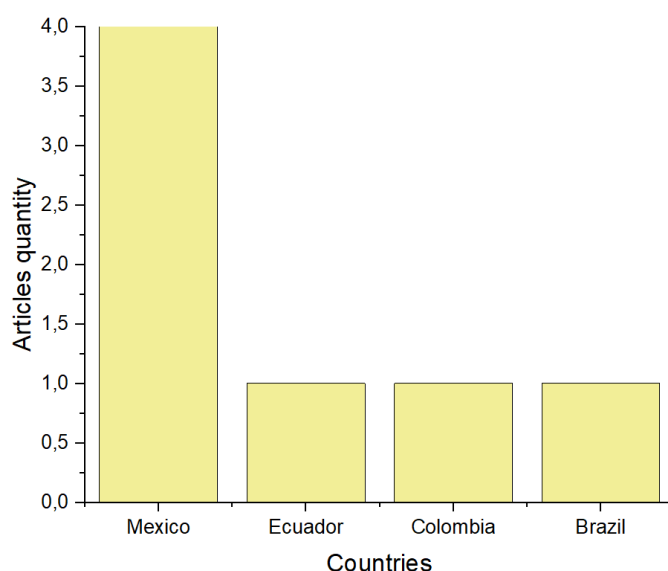


Figura 14 - Número de Publicações na América Latina

Entre os artigos encontrados, o estudo de Alvarado-Zambrano *et al.* (2023) foi o único a realizar uma análise direta e detalhada de Mps em águas subterrâneas. A pesquisa investigou um aquífero costeiro no noroeste do México e revelou a predominância de fibras e fragmentos como os tipos mais comuns de Mps, compostos principalmente por polietileno (PE) e polipropileno (PP). Os autores utilizaram técnicas avançadas de identificação, como a espectroscopia FTIR, para caracterizar os Mps presentes nas amostras. O estudo relacionou a contaminação ao descarte inadequado de plásticos e à intrusão de água salina, ambos intensificados pela urbanização da região. Este trabalho

destacou a necessidade de ampliar as pesquisas sobre a contaminação de aquíferos subterrâneos, considerando a importância desse recurso hídrico.

Outro artigo relevante foi o de Paredes *et al.* (2019), que analisou a presença de Mps em fontes de água potável na cidade de Riobamba, no Equador, que depende fortemente de aquíferos subterrâneos. Os fragmentos foram identificados como os Mps mais prevalentes, seguidos por fibras, com os polímeros PE e PP sendo os principais componentes detectados. Os pesquisadores utilizaram microscopia óptica e espectroscopia para identificar e caracterizar os Mps, cujos tamanhos variaram de partículas microscópicas a visíveis a olho nu. Os autores sugerem que o descarte inadequado de resíduos sólidos é a principal fonte de contaminação, levantando preocupações sobre os riscos à saúde e à qualidade da água.

No México, o estudo de Ruiz-Fernández *et al.* (2024) focou na análise de sedimentos em uma lagoa costeira urbanizada, revelando uma aceleração na contaminação por Mps desde os anos 1990. Já Aguilar *et al.* (2023) realizaram uma revisão sistemática que abordou poluentes emergentes no México, incluindo Mps. O estudo de Mora *et al.* (2021) revisou os impactos ambientais e à saúde humana relacionados ao rio Atoyac, um dos mais poluídos do México, destacando o potencial de infiltração de Mps em aquíferos adjacentes.

No Brasil, o trabalho de Dantas Filho *et al.* (2023) trouxe as primeiras evidências da presença de Mps em águas doces destinadas a pisciculturas no estado de Rondônia. Embora focado em águas superficiais, o estudo levantou preocupações sobre a possibilidade de Mps se infiltrarem no solo e contaminarem aquíferos próximos. Já o artigo de Aranguren-Díaz *et al.* (2024) apresentou uma revisão ampla sobre os desafios e oportunidades na gestão de águas subterrâneas na Colômbia, apontando os Mps como contaminantes emergentes que exigem monitoramento e estratégias de mitigação.

Embora nenhum destes estudos, além dos de Alvarado-Zambrano *et al.* (2023) e Paredes *et al.* (2019), tenham realizado análises diretas de Mps em águas subterrâneas, todos destacam esses poluentes como uma preocupação emergente. Os artigos reforçam a necessidade de integrar o monitoramento de Mps na gestão de aquíferos, especialmente em regiões densamente povoadas, industrializadas ou agrícolas.

Abordagens integradas para mitigação da contaminação por microplásticos em águas subterrâneas

Inicialmente, é fundamental investimentos em estudos específicos que incluem análises de contaminação por Mps em solos (Hurley & Nizzetto, 2018) e em águas subterrâneas (AT *et al.*, 2024). Em seguida, conforme observado por Li *et al.* (2024), é essencial entender a forma aprofundada do comportamento dos PMs nesse ambiente para orientar estratégias de mitigação eficazes. A padronização de fatores como tamanho das partículas, cor e tipo de plástico poderia estabelecer uma “biblioteca de referência” para agilizar futuras pesquisas e ampliar o conhecimento científico sobre o tema. Essa padronização, juntamente com métodos consistentes de análise química, facilitaria a obtenção de dados confiáveis e comparáveis, promovendo um monitoramento mais eficaz e colaborativo (Sharma *et al.*, 2024).

Faz-se necessário também, incentivar políticas públicas para prevenir essa contaminação em sua origem, atuando sobre o descarte inadequado de plásticos (Yahans Amuah *et al.*, 2022). Medidas como o aumento da coleta seletiva e a promoção de programas de educação ambiental para o descarte adequado de resíduos plásticos são essenciais para reduzir a carga de Mps no ambiente (Gündoğdu *et al.*, 2023). Por fim, investimento em pesquisas médicas sobre as verdadeiras consequências de poluição por Mps no corpo humano, a fim de entender os efeitos para a saúde humana (Sangkhamet *et al.*, 2023).

Conclusão

Esta revisão destacou o avanço dos estudos sobre a contaminação por Mps em águas subterrâneas, evidenciando um crescimento significativo na investigação global, com destaque para os últimos 5 anos. Contudo, permanece um vazio importante: a maioria dos estudos ainda não realiza coletas diretamente da fonte, limitando a compreensão específica da presença e comportamento dos Mps nesse ambiente crítico.

A necessidade de padronização global do que é considerado Mps, juntamente com o desenvolvimento de bibliotecas de dados acessíveis e o incentivo ao uso de tecnologias, como μ FTIR e Raman, é evidente. Essas ferramentas são indispensáveis para caracterizar os Mps com precisão, permitindo uma análise mais consistente e complexa. Além disso, foi identificado um déficit significativo de pesquisas na América Latina, uma região de grande importância hídrica, com algumas das maiores reservas subterrâneas do mundo. Investimentos direcionados para pesquisas e monitoramento

sistemático são essenciais para proteger esses recursos estratégicos contra contaminantes emergentes, como os Mps.

Para mitigar a contaminação por Mps, é crucial atacar o problema em sua origem, promovendo políticas que incentivem a redução do uso de plásticos aplicados, ampliem a reciclagem e melhorem a gestão de resíduos. Também é vital apoiar estudos focados em tecnologias de remoção de Mps da água, garantindo não apenas a qualidade desses recursos, mas também sua preservação para as gerações futuras.

Referências Bibliográficas

AGBOOLA, O.; BENSON, N. Mecanismos de fisissorção e quimissorção que influenciam as interações entre micro (nano) plásticos e contaminantes químicos orgânicos: uma revisão. *Frontiers in Environmental Science*, v. 9, 2021. doi: 10.3389/fenvs.2021.678574

AGUILAR-AGUILAR, A., ET AL. Uma revisão sistemática sobre a situação atual dos poluentes emergentes no México: Uma perspectiva sobre políticas, regulamentação, detecção e eliminação em água e esgoto. *Science of The Total Environment*, v. 905, p. 167426, 2023.: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167426>

ALBAZONI, HJ; AL-HAIDAREY, MJS; NASIR, AS Uma revisão da poluição por microplásticos: efeito prejudicial ao meio ambiente e aos animais, estratégias de remediação. *Journal of Ecological Engineering*, v. 25, n. 2, p. 140–157, 2024. <https://doi.org/10.12911/22998993/176802>.

ALMEIDA, MP et al. A dinâmica complexa da migração de microplásticos por diferentes ambientes aquáticos: subsídios para uma melhor compreensão de sua dispersão ambiental. *Microplastics*, 2 (1), 62-77; <https://doi.org/10.3390/microplastics2010005>

ALVARADO-ZAMBRANO, DANIELA; RIVERA-HERNÁNDEZ, JOSÉ R.; GREEN-RUIZ, CARLOS. Primeiro insight sobre poluição de águas subterrâneas por microplásticos na América Latina: o caso de um aquífero costeiro no noroeste do México. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 29, p. 73600-73611, 2023. 1. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27461-9>.

ARANGUREN-DÍAZ, YANI ET AL. Aquíferos e águas subterrâneas: desafios e oportunidades na gestão de recursos hídricos na Colômbia. *Water*, v. 16, n. 5, p. 685, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16050685>

AT, R., ET AL. Uma revisão concisa do impacto da poluição das águas subterrâneas em regiões costeiras na composição do microbioma intestinal humano e seu efeito na saúde

humana. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 26, p. 101187, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101187>.

BALESTRA, V.; VIGNA, B.; DE COSTANZO, S.; BELLOPEDE, R. Investigações preliminares da poluição microplástica em sistemas cársticos, de cursos de água superficiais a águas de cavernas. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 252, p. 104117, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104117>.

BÄUERLEIN, PS; HOFMAN-CARIS, RCHM; PIEKE, EN; TER LAAK, TL. Destino dos microplásticos na produção de água potável. *Pesquisa sobre Água*, v. 221, pág. 118790, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118790>.

BOTLE, A., et al. Breve estado de contaminação em águas superficiais de rios da Índia por metais pesados: uma revisão com índices de poluição e avaliação de risco à saúde. *Environ Geochem Health*. 45, 2779–2801 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01463-x>

CAMPANALE, Claudia et al. Um estudo de revisão detalhado sobre os efeitos potenciais de microplásticos e aditivos preocupantes na saúde humana. *Revista internacional de pesquisa ambiental e saúde pública*, v. 17, n. 4, p. 1212, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>

CARPENTER, EJ; SMITH, KL. Plásticos na superfície do Mar dos Sargaços. *Science*, v. 175, n. 4027, p. 1240–1241, 1972. DOI: [10.1126/science.175.4027.1240](https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240)

CHA, J.; LEE, J.-Y.; CHIA, RW. Contaminação por microplásticos e características de águas subterrâneas agrícolas na Bacia de Hae-an, na Coreia. *Science of The Total Environment*, v. 864, p. 161027, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161027>.

CHA, J.; LEE, J.-Y.; LEE, J. Efeitos do volume de amostra de água subterrânea em microplásticos identificados em água subterrânea de uma área agrícola na Coreia. *Science of The Total Environment*, v. 911, p. 168650, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168650>.

CHEN, Q., WANG, P., LIU, R., DING, M., ZHANG, H., HUANG, G. E NIE, M. 2025. Inconsistências experimentais prejudicam a caracterização precisa de microplásticos e a identificação de fatores ambientais: uma análise de metadados no ambiente aquático chinês. *Ecological Indicators*, 170, p.113053. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.113053>

CHIA, RW; LEE, J.-Y.; JANG, J.; CHA, J. Erros e práticas recomendadas que devem ser identificadas para reduzir concentrações suspeitas de microplásticos no solo e nas águas subterrâneas: Uma revisão. *Environmental Technology & Innovation*, v. 28, p. 102933, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102933>.

- COLE, M. et al.** Microplásticos como contaminantes no ambiente marinho: uma revisão. *Marine Pollution Bulletin*, v. 62, n. 12, p. 2588–2597, 2011. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2011.09.025](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025)
- EERKES-MEDRANO, D.; QUINN, B.** Microplásticos em água potável: Uma revisão e avaliação. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, v. 7, p. 69–75, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.12.001>.
- EERKES-MEDRANO, DAFNE; THOMPSON, RICHARD C.; ALDRIDGE, DAVID C.** Microplásticos em sistemas de água doce: uma revisão das ameaças emergentes, identificação de lacunas de conhecimento e priorização de necessidades de pesquisa. *Water research*, v. 75, p. 63-82, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.waters.2015.02.012>.
- ESFANDIARI, A.; ABBASI, S.; PEELY, AB; MOWLA, D.; GHANBARIAN, MA; OLESZCZUK, P.; TURNER, A.** Distribuição e transporte de microplásticos em águas subterrâneas (aquífero de Shiraz, sudoeste do Irã). *Water Research*, v. 220, p. 118622, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118622>.
- FERGUSON, G., ET AL.** 2021. Volumes de águas subterrâneas crustais maiores do que se pensava anteriormente. *Geophysical Research Letters*, 48(16). <https://doi.org/10.1029/2021GL093549>
- GAO, J.; PAN, S.; LI, P.; WANG, L.; HOU, R.; WU, W.-M.; LUO, J.; HOU, D.** Migração vertical de microplásticos em meios porosos: múltiplos fatores de controle sob ciclo úmido-seco. *Journal of Hazardous Materials*, v. 419, p. 126413, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126413>.
- GEISSEN, V. et al.** Poluentes emergentes no meio ambiente: Um desafio para a gestão dos recursos hídricos. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 3, n. 1, p. 57–65, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.03.002>.
- GEYER, R.; LAW, KL** Produção, uso e destino de todos os plásticos já feitos. *Science Advances*, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017. DOI: [10.1126/sciadv.1700782](https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782)
- GLEESON, T., BEFUS, KM, JASECHKO, S., LUIJENDIJK, E. E CARDENAS, MB.** 2016. O volume global e distribuição de águas subterrâneas modernas. *Nature Geoscience*, 9(2), pp.161-167. <https://doi.org/10.1038/ngeo2590>
- GUNARATHNE, V. et al.** Armadilhas ambientais e riscos associados à saúde humana e impactos ecológicos de contaminantes de lixiviados de aterros sanitários: evidências atuais, intervenções recomendadas e direções futuras. *Science of The Total Environment*, v. 912, p. 169026, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169026>.

- GÜNDOĞDU, S. et al.** Micro e nano plásticos em sistemas de águas subterrâneas: Uma revisão do conhecimento atual e perspectivas futuras. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 165, p. 117119, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117119>.
- GUO, W., LI, D., CHEN, B., LI, J., LI, Z., CAO, X., QIU, H. E ZHAO, L.,** 2025. Colonização microbiana em quatro tipos de microplásticos para formar biofilme afetando diferencialmente a biodegradação de contaminantes orgânicos. *Chemical Engineering Journal*, 503, p.158060. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158060>
- HAJJI, S. et al.** Os processos de secagem e desidratação de lodo influenciam a abundância e as características dos microplásticos em estações de tratamento de águas residuais. *Chemosphere*, v. 339, p. 139743, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139743>.
- HURLEY, RR; NIZZETTO, L.** Destino e ocorrência de micro(nano)plásticos em solos: lacunas de conhecimento e possíveis riscos. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, v. 1, p. 6–11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006>.
- ISSAC, MN; KANDASUBRAMANIAN, B.** Efeito de microplásticos em água e sistemas aquáticos. *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 28, n. 16, p. 19544–19562, 2021. DOI: [10.1007/s11356-021-13184-2](https://doi.org/10.1007/s11356-021-13184-2)
- JEONG, E. et al.** Contaminação por microplásticos em águas subterrâneas de áreas rurais, parte oriental da Coreia. *Science of The Total Environment*, v. 895, p. 165006, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165006>.
- JEONG, E.; LEE, J.-Y.; REDWAN, M.** Exposição animal a microplásticos e efeitos na saúde: Uma revisão. *Emerging Contaminants*, v. 10, n. 4, p. 100369, 2024.
- JIANG, Jia-Qian.** Ocorrência de microplásticos e sua poluição no meio ambiente: Uma revisão. *Produção e consumo sustentáveis*, v. 13, p. 16-23, 2018. DOI: [10.1016/j.spc.2017.11.003](https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.11.003)
- K, MB et al.** Distribuição espacial da concentração de microplásticos ao redor de aterros sanitários e seu risco potencial para as águas subterrâneas. *Chemosphere*, v. 277, p. 130263, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130263>.
- KIM, Y.-I. et al.** Contaminação por microplásticos em águas subterrâneas em uma ilha vulcânica de Jeju, na Coreia. *Environmental Research*, v. 226, p. 115682, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115682>
- KIM, Y.-N.; YOON, J.-H.; KIM, K.-HJ.** Contaminação microplástica no ambiente do solo – uma revisão. *Soil Science Annual*, v. 71, n. 4, p. 300–308, 2020. DOI: [10.37501/soilsa/131646](https://doi.org/10.37501/soilsa/131646)

- KING, CD et al.** Atitudes dos agricultores em relação aos plásticos agrícolas – Gestão e descarte, conscientização e percepções dos impactos ambientais. *Science of The Total Environment*, v. 864, p. 160955, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160955>.
- KOELMANS, AA et al.** Microplásticos em águas doces e potáveis: revisão crítica e avaliação da qualidade dos dados. *Water Research*, v. 155, p. 410–422, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>.
- KOOI, M. et al.** Altos e baixos no oceano: efeitos da bioincrustação no transporte vertical de microplásticos. *Environmental Science & Technology*, v. 51, 2017.
- LA CECILIA, D. et al.** Atenuação de microplásticos de águas superficiais para água potável: Impacto do tratamento e recarga de aquíferos gerenciados – e incertezas de identificação. *Science of The Total Environment*, v. 908, p. 168378, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168378>.
- LARAMIE, AR et al.** Avaliação de campo de biorretenção projetada como afundamento de microplásticos por meio de caracterização do local e modelagem hidrológica. *Journal of Hazardous Materials*, v. 480, p. 136058, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136058>.
- LEE, Y. et al.** Efeitos na saúde das exposições a microplásticos: questões e perspectivas atuais na Coreia do Sul. *Yonsei Medical Journal*, v. 64, n. 5, p. 301–308, 2023.
- LI, F. et al.** Microplásticos/ nanoplásticos em meios porosos: Principais fatores que controlam seus comportamentos de transporte e retenção. *Science of The Total Environment*, v. 926, p. 171658, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171658>.
- LI, M. et al.** Avanços na pesquisa sobre contaminação por microplásticos no geoambiente terrestre: Uma revisão. *Science of The Total Environment*, v. 935, p. 173259, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173259>.
- LI, S. et al.** Cotransporte de microplásticos e antibióticos sulfanilamida em águas subterrâneas: O impacto da razão MP/SA e do meio aquífero. *Environmental Research*, v. 218, p. 114403, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114403>.
- LI, W. et al.** Transporte experimental e simulado de microplásticos em sedimentos naturais saturados: Impacto do tamanho do grão e do tamanho da partícula. *Journal of Hazardous Materials*, v. 468, p. 133772, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133772>.
- LI, Y. et al.** Poluição por microplásticos em rios urbanos dentro das formas de relevo de Danxia na China: Características de distribuição espacial, migração e avaliação de risco. *Science of The Total Environment*, v. 910, p. 168610, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168610>.

- LIU, Y. et al.** Características e fontes de poluição por microplásticos na água e sedimentos da Bacia do Rio Jinjiang, Província de Fujian, China. *China Geology*, v. 5, n. 3, p. 429–438, 2022. <https://doi.org/10.31035/cg2022051>.
- LIU, Z.; BACHA, A.-U.-R.; YANG, L.** Estratégias de controle para poluição por microplásticos em águas subterrâneas. *Environmental Pollution*, v. 335, p. 122323, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122323>.
- LOFTY, J. et al.** Remoção de microplásticos de um tanque de decantação primária em uma estação de tratamento de águas residuais e estimativas de contaminação em terras agrícolas europeias por meio da reciclagem de lodo de esgoto. *Environmental Pollution*, v. 304, p. 119198, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119198>.
- MAURIZI, L. et al.** As plantas de água potável retêm microplásticos? Um estudo exploratório usando microespectroscopia Raman. *Heliyon*, v. 9, n. 6, e17113, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17113>.
- MAURIZI, L. et al.** É importante como medimos - Quantificação de microplásticos em água potável por μ FTIR e μ Raman. *Heliyon*, v. 9, n. 9, e20119, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20119>.
- MIGWI, FK; OGUNAH, JA; KIRATU, JM.** Ocorrência e distribuição espacial de microplásticos nas águas superficiais do Lago Naivasha, Quênia. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 39, n. 4, p. 765–774, 2020. DOI: [10.1002/etc.4677](https://doi.org/10.1002/etc.4677)
- MORA, A. et al.** Uma revisão do status ambiental atual e das implicações para a saúde humana de um dos rios mais poluídos do México: o Rio Atoyac, Puebla. *Science of The Total Environment*, v. 782, p. 146788, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788>.
- MU, H. et al.** Alta abundância de microplásticos em águas subterrâneas na Península de Jiaodong, China. *Science of The Total Environment*, v. 839, p. 156318, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156318>.
- OLADOJA, NA; UNUABONAH, IE.** Os caminhos da contaminação por microplásticos em água bruta e potável. *Journal of Water Process Engineering*, v. 41, p. 102073, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102073>.
- OSMAN, Ahmed I. et al.** Custo, impacto ambiental e resiliência da energia renovável sob um clima em mudança: uma revisão. *Environmental chemistry letters*, v. 21, n. 2, p. 741-764, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>
- PADGELWAR, Sanket; NANDAN, Abhishek; MISHRA, Abhishek Kumar.** Gestão de resíduos plásticos e cenário atual na Índia: uma revisão. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, v. 101, n. 13, p. 1894-1906, 2021. DOI: [10.1080/03067319.2019.1686496](https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1686496)

- PAN, Y. *et al.* Remoção de microplásticos de ambientes aquáticos: uma revisão crítica. *Environmental Science and Ecotechnology*, v. 13, p. 100222, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.es.2022.100222>
- PAREDES, Marcel *et al.* Microplásticos na água potável da cidade de Riobamba, Equador. *Revista Científica Engenharia e Ciências Ambientais (SREES)*, v. 28, n. 4, p. 653-663, 2019. DOI: [10.22630/PNIKS.2019.28.4.59](https://doi.org/10.22630/PNIKS.2019.28.4.59)
- PARKER, L. Microplásticos estão em nossos corpos. O quanto eles nos prejudicam? *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/microplastics-are-in-our-bodies-how-much-do-they-harm-us>. Acessado em: 30 de maio de 2024.
- PAVITHRA, K. *et al.* Microplásticos em água engarrafada, água armazenada na comunidade, água subterrânea e água de superfície em rios de Tamil Nadu após o surto da pandemia de COVID-19. *Journal of Environmental Management*, v. 356, p. 120361, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120361>.
- Plastics Europe. **Plastics - The facts 2016**. Uma análise dos dados de produção, demanda e resíduos de plásticos europeus. Paris, França. <https://www.plast.org/application/files/4315/1310/4805/plastic-the-fact-2016.pdf>
- PURUSHOTHAMAN, A. *et al.* Padrões e variabilidade na contaminação por microplásticos ao longo da costa sudoeste da Índia com ênfase em locais de descarga de águas subterrâneas submarinas. *Marine Pollution Bulletin*, v. 194, p. 115432, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115432>.
- RAHMAN, MA; HAQUE, MM; TAREQ, SM. Abundância e características de microplásticos no lixiviado do aterro de Amin Bazar, Dhaka: Um risco potencial para ambientes aquáticos. *Física e Química da Terra, Partes A/B/C*, v. 134, p. 103573, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103573>.
- ROCHMAN, CM *et al.* Repensando os microplásticos como um conjunto diversificado de contaminantes. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 38, n. 4, p. 703–711, 2019. DOI: [10.1002/etc.4371](https://doi.org/10.1002/etc.4371)
- RUIZ-FERNÁNDEZ, Ana Carolina *et al.* Acelerando a contaminação por microplásticos em núcleos de sedimentos datados de 210Pb de uma lagoa costeira urbanizada (NW México) desde a década de 1990. *Science of The Total Environment*, v. 951, p. 175613, 2024. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.175613](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175613)
- SAMANDRA, S. *et al.* Contaminação microplástica de um aquífero subterrâneo não confinado em Victoria, Austrália. *Science of The Total Environment*, v. 802, p. 149727, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149727>.

SANGKHAM, S. et al. Evidências de microplásticos em águas subterrâneas: Um risco crescente para a saúde humana. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 23, p. 100981, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100981>.

SHARMA, P.; ABHISHEK, K. Metodologia de amostragem, separação e caracterização para quantificação de microplástico do ambiente. *Journal of Hazardous Materials Advances*, v. 14, p. 100416, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100416>.

SHU, X. et al. Características de distribuição espacial e migração de microplásticos em águas superficiais, subterrâneas e sedimentos em áreas cársticas: O caso do Rio Yulong em Guilin, sudoeste da China. *Science of The Total Environment*, v. 868, p. 161578, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161578>.

SONG, Yang et al. Absorção e efeitos adversos de fibras de microplásticos de tereftalato de polietileno em caracóis terrestres (*Achatina fulica*) após exposição ao solo. *Environmental Pollution*, v. 250, p. 447-455, 2019.

VIAROLI, S.; LANCIA, M.; RE, V. Contaminação de águas subterrâneas por microplásticos: evidências atuais e perspectivas futuras. Uma revisão. *Science of The Total Environment*, v. 824, p. 153851, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153851>.

VIEIRA DANTAS FILHO, J. et al. Primeira evidência de microplásticos em água doce de fazendas de peixes no estado de Rondônia, Brasil. *Heliyon*, v. 4, e15066, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15066>.

VIEIRA, KS et al. Ocorrência de acúmulo de microplásticos e metais pesados em ostras nativas *Crassostrea Gasar* no sistema estuarino de Paranaguá, Brasil. *Marine Pollution Bulletin*, v. 166, p. 112225, 2021. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2021.112225](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112225)

WALKER, T.; FEQUET, L. Tendências atuais de produção insustentável de plástico e poluição por micro(nano)plásticos. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 160, p. 116984, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116984>

Wazne, M., Schneidewind, U., Haverson, L., Mermillod -Blondin, F., Simon, L., Nel, HA e Krause, S., 2025. O que encontramos depende de como fazemos a amostragem? As concentrações de microplásticos medidas no leito do rio podem ser afetadas pela escolha do método de amostragem. *Science of The Total Environment*, 958, p.178096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178096>

WEI, Z. et al. Dinâmica sazonal e tipologia da poluição por microplásticos em águas subterrâneas de pântanos cársticos de Huixian: Implicações para a saúde do ecossistema. *Journal of Environmental Management*, v. 358, p. 120882, 2024.: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120882>.

XU, J. et al. Distribuição global, drivers e riscos potenciais de microplásticos em águas subterrâneas: Uma revisão. *Science of The Total Environment*, v. 954, p. 176194, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176194>.

YAHANS AMUAH, EE; BOADU, JA; NANDOMAH, S. Questões emergentes e abordagens para proteger e sustentar recursos de águas superficiais e subterrâneas: ênfase em Gana. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 16, p. 100705, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100705>.

Zamrsky, DX., Oude Essink, GH e Bierkens, MF, 2024. Impacto global da elevação do nível do mar nos recursos costeiros de água doce subterrânea. *O futuro da Terra*, 12(1). <https://doi.org/10.1029/2023EF003581>

Zhang, H., et al. 2025. Avanços e desafios na detecção de microplásticos e avaliação de risco: Integrando IA e métodos padronizados. *Marine Pollution Bulletin*, 212, p.117529. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117529>

ZHANG, T. et al. Status atual da poluição por microplásticos no ambiente aquático, interação com outros poluentes e efeitos em organismos aquáticos. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 12, p. 16830–16859, 2022. DOI: [10.1007/s11356-022-18504-8](https://doi.org/10.1007/s11356-022-18504-8)

ZOLOTOVA, N. et al. Efeitos nocivos da poluição por microplásticos na saúde animal: uma revisão da literatura. *PeerJ*, v. 10, p. e13503, 2022. doi: [10.7717/peerj.13503](https://doi.org/10.7717/peerj.13503)

6.2. CAPÍTULO 2 –

OCORRÊNCIA DE MICRO E MACROPLÁSTICOS EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE MARICÁ (RIO DE JANEIRO – BRASIL)

Lara Luiza de Oliveira Pompermayer; Danieli Lima da Cunha; Joel de Matos Júnior;
Diego Gomes de Carvalho; Luís Felipe da Silva Pinto Azeredo; Khauê Silva Vieira;
Mônica Regina da Costa Marques Calderari; José Antonio Baptista Neto

Resumo

Embora a contaminação por Mps em águas superficiais e oceânicas tenha sido amplamente debatida por décadas, a presença de detritos plásticos em águas subterrâneas tem sido notavelmente pouco estudada. Este estudo investigou a ocorrência e caracterização de nano, micro e macroplásticos em poços de águas subterrâneas no município de Maricá, localizado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, Brasil. A rede de amostragem compreende um total de 126 poços distribuídos em nove zonas distintas do município. As amostras de água foram realizadas seguindo um rigoroso protocolo de saneamento para minimizar a contaminação externa. A água coletada foi filtrada usando membranas de acetato de celulose de 0,45 µm e analisada sob um microscópio Olympus SZX16 de alta precisão para identificação e classificação de polímeros. Detritos plásticos foram detectados em 94 dos 126 poços examinados, com concentrações variando de 13 a 63 itens/L por zona amostrada. As fibras constituíram a maioria (96,4%) dos plásticos detectados, sendo o azul a cor predominante. Em relação ao tamanho, 41,3% foram classificados como Mps, enquanto 58,7% foram categorizados como meso e macroplásticos. Entre as 45 amostras analisadas por espectroscopia µFTIR, 40% foram identificadas como celulose, enquanto o polietileno (PE) foi responsável por 15,9%. Outros polímeros detectados incluíram poliamida (PA), tereftalato de polietileno (PET) e poliestireno (PS), cada um compreendendo 9,1% do total. Além disso, o ácido poliacrílico (PAA) estava presente em 4,5%, tris (dipropilenoglicol) fosfito (TRIS) em 2,5% e dextrano em 6,8%. A abundância de micro e macroplásticos na região é atribuída às atividades humanas, infraestrutura de saneamento inadequada, alta permeabilidade do solo e conectividade hidráulica entre as águas subterrâneas, o sistema de lagoas costeiras e o mar. As descobertas deste estudo não apenas fornecem uma base valiosa para pesquisas futuras sobre contaminação por

plástico em águas subterrâneas, mas também oferecem insights essenciais para a implementação de medidas para mitigar a poluição por plástico e proteger as fontes de água potável.

Introdução

Amplamente utilizado na contemporaneidade, o plástico se destaca por suas características multifuncionais, como resistência térmica, estabilidade química, flexibilidade e custo acessível, consolidando-se como um material indispensável em diversos setores industriais (Almeida *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023). No entanto, seu impacto ambiental, especialmente devido à sua persistência em ecossistemas terrestres e aquáticos, é uma crescente preocupação global (Pan *et al.*, 2023).

A presença de micro e macrolásticos foi relatado pela primeira vez na década de 1970, quando Carpenter e Smith (1972) identificaram partículas de plástico em amostras oceânicas. Desde então, estudos têm explorado sua distribuição e impactos em diferentes ambientes, estabelecendo um padrão de classificação baseado no tamanho: macro (> 25 mm), meso (5–25 mm), micro (1 µm –5 mm) e nano (< 1 µm) (Kim *et al.*, 2020). Além disso, os MPs são categorizados como primários, fabricados em pequenas partículas (por exemplo, microesferas cosméticas), ou secundários, resultantes da fragmentação de plásticos maiores por processos físicos, químicos ou biológicos (Issac & Kandasubramanian, 2021; Campoy & Beiras, 2019).

Embora existam inúmeros estudos sobre Mps em oceanos e águas superficiais, a contaminação de águas subterrâneas representa um problema crítico e ainda pouco explorado. Esses resíduos se infiltram não apenas por meio do escoamento superficial, chorume ou atividades humanas, como o descarte inadequado de resíduos sólidos (Chia *et al.*, 2021). A presença de Mps em aquíferos, associada à sua persistência e capacidade de adsorver contaminantes como metais pesados e compostos orgânicos nocivos, ameaça seriamente a qualidade da água potável, conforme destacado por Viaroli *et al.* (2022). Além disso, a falta de métodos padronizados para coleta e análise dificulta a avaliação da extensão desse problema (Esfandiari *et al.*, 2022). No município de Maricá, localizado na região dos lagos do estado do Rio de Janeiro, desafios relacionados ao gerenciamento de resíduos, saneamento básico e intrusão salina em aquíferos devido à superexploração reforçam a necessidade de estudos na área (Cruz *et al.*, 2006). Considerando a dependência de águas subterrâneas como principal fonte de

suprimento, este estudo tem como objetivo detectar a presença de micro e macroplásticos em 126 poços perfurados, quantificar e classificar os detritos plásticos encontrados e identificar possíveis fontes de contaminação. Esta investigação visa contribuir para o entendimento das ameaças à qualidade das águas subterrâneas locais.

Área de estudo

O município de Maricá (Figura 15) está localizado na região dos lagos, a aproximadamente 60 km da cidade do Rio de Janeiro, nas coordenadas 22° 55' 10" S e 42° 49' 07" W, e possui aproximadamente 197.300 habitantes segundo o último Censo de 2022 (IBGE, 2022).

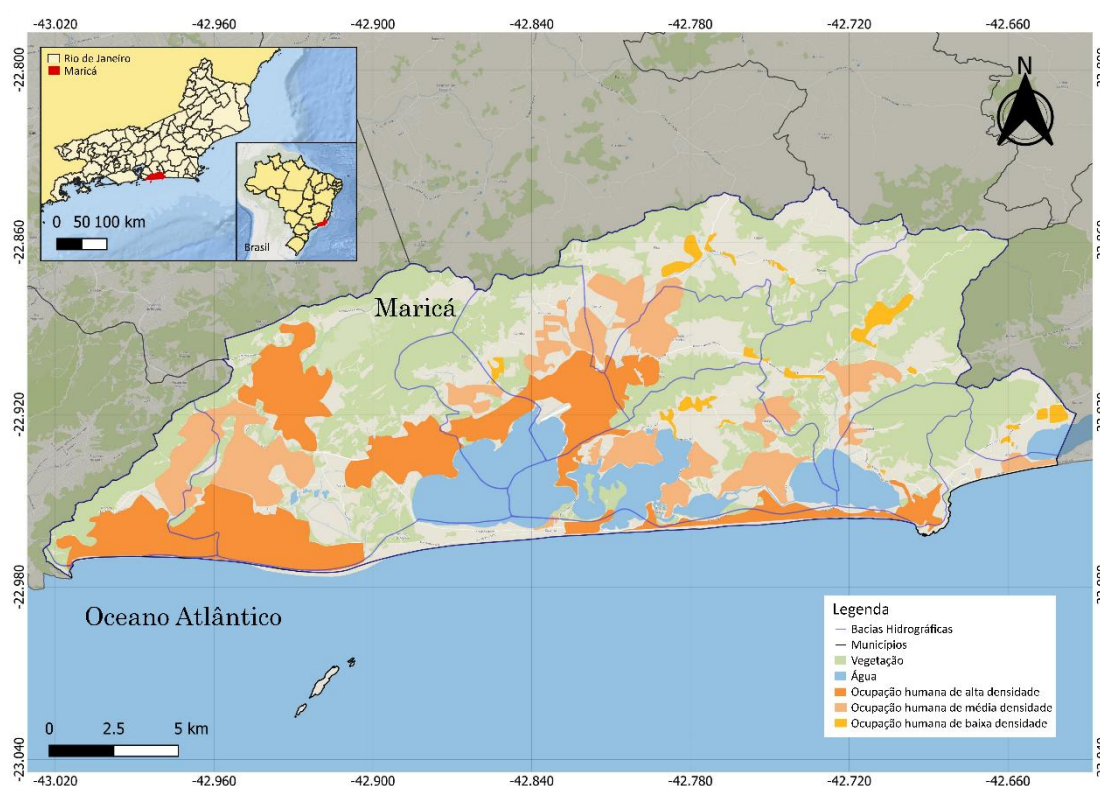


Figura 15 - Mapa de densidade populacional e ocupação humana do município de Maricá – RJ. (Baseado nos dados do Censo Demográfico 2010 do IBGE).

Caracteriza-se por um clima tropical com temperaturas quentes e alta umidade (Cruz *et al.*, 1996) e possui uma geologia diversificada com regiões de falésias e rochas cristalinas como granitos e gnaisses, constituindo em grande parte o substrato rochoso predominante e favorecendo o armazenamento e movimentação de águas subterrâneas (Eger, Silva Junior & Cristo, 2013). Além disso, destacam-se as planícies costeiras arenosas, formadas por sedimentos inconsolidados, que apresentam elevada permeabilidade e facilitam a infiltração da água da chuva para os aquíferos

subterrâneos, contribuindo significativamente para a recarga hídrica natural nessas regiões (DA SILVA *et al.*, 2014).

Possui um notável potencial hidrológico devido à sua geografia costeira e à presença de diversas lagoas e cursos d'água em seu território, sendo o Sistema Lagunar de Maricá um dos mais proeminentes (Figura 1). Essas vastas lagoas não só contribuem para a paisagem cênica da região, mas também desempenham um papel crucial na regulação do ciclo hidrológico local (Silvestre *et al.*, 2017).

Os aquíferos encontrados na região são granulares, compostos predominantemente por areias quartzosas com presença de solos siltosos e argilosos, e apresentam boas características de armazenamento e transmissão de água, principalmente nas áreas com sedimentos mais espessos (Cruz *et al.*, 2006).

Grande parte de sua área é ocupada por pousadas urbanas, principalmente na região de Itaipuaçu e nas áreas próximas às lagoas (Figura 1). Apesar do notável crescimento populacional, impulsionado não apenas pelo aumento natural, mas também pela considerável migração atraída pelos benefícios proporcionados pelos royalties do petróleo, que contribuíram para a implementação de medidas positivas pela administração pública, o município ainda enfrenta desafios significativos em relação à infraestrutura, saneamento básico e abastecimento de água para a população (Reis & Rosas, 2022). De acordo com os últimos dados disponíveis, em 2010 divulgados pelo IBGE, aproximadamente 74,13% da população utilizava nascentes e poços em suas próprias terras como principal fonte de abastecimento de água. Isso sugere uma considerável dependência de fontes hídricas locais, o que pode estar sujeito a preocupações sobre qualidade e disponibilidade, especialmente em áreas onde a exploração dessas fontes pode ser insustentável. Segundo dados do IBGE 2017, houve redução desse percentual, com apenas 63,25% da população tendo acesso à rede de abastecimento de água potável, e apenas 64,4% dos domicílios possuíam rede de esgoto, sugerindo que uma parcela significativa da população ainda apresenta condições inadequadas de saneamento, o que pode ter implicações para a saúde pública. Esses dados ressaltam a importância do investimento contínuo em infraestrutura de água e saneamento em Maricá para garantir o acesso universal à água potável e a sistemas de esgoto adequados, tanto para beneficiar a saúde e o bem-estar dos moradores quanto para contribuir para a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento econômico da região.

Metodologia

Amostragem

Para garantir a construção de uma grade de amostragem abrangente, 126 estações foram selecionadas dentro da região designada, distribuídas em zonas de amostragem específicas (Figura 16).

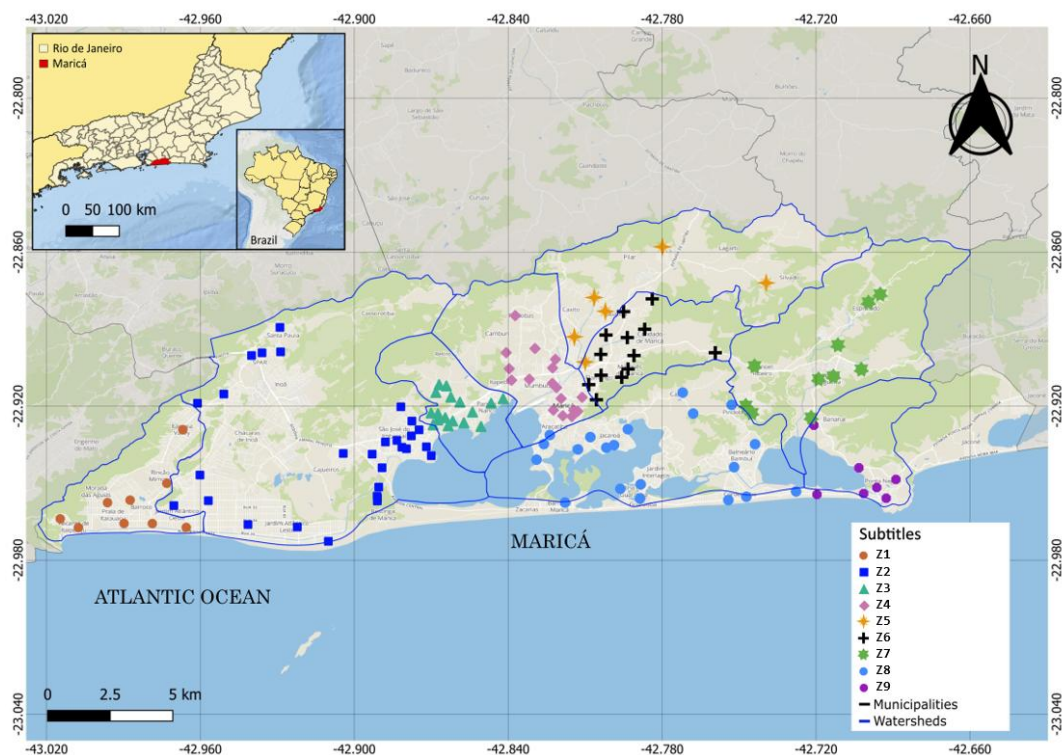


Figura 16 - Mapa das zonas de estudo no município de Maricá e entorno (Baseado em dados do IBGE, ANA, 2025).

A delimitação dessas zonas foi baseada nos limites da bacia hidrográfica da região, com pontos de amostragem estrategicamente escolhidos perto de locais como centros de saúde, postos de gasolina, oficinas mecânicas, restaurantes, cemitérios e residências particulares. Amostras de água subterrânea para análise de detritos plásticos foram coletadas entre julho de 2022 e janeiro de 2023. Embora esse período tenha abrangido duas estações, não ocorreu nenhum evento de precipitação significativo que pudesse ter influenciado nos resultados. Para a coleta de amostras, foram utilizadas garrafas de vidro âmbar de 1 L previamente limpas e descontaminadas. Cada garrafa foi enxaguada pelo menos três vezes com água de seu respectivo local de amostragem para garantir a integridade da amostra.

O método de coleta foi adaptado às características de cada local de amostragem. Amostras de água foram obtidas diretamente de torneiras e mangueiras conectadas (para poços subterrâneos) ou usando uma garrafa Van Dorn e um balde de aço (para poços de superfície). Quando coletada de torneiras ou mangueiras, a água foi deixada fluir por pelo menos três minutos antes da amostragem para eliminar qualquer água parada dentro dos canos. Embora a metodologia tenha sido adaptada às condições específicas da área de estudo, ela foi baseada em protocolos estabelecidos por pesquisas anteriores (Panno *et al.*, 2019; Brožová *et al.*, 2023).

Para garantir a segurança e o controle de qualidade, nenhum recipientes e ferramentas usados durante o trabalho de campo foram de materiais plásticos e foram meticulosamente limpos e armazenados para evitar contaminação potencial. A equipe de pesquisa recebeu treinamento adequado e aderiu a protocolos rígidos de controle de contaminação, usando luvas de látex e uniformes de algodão durante todo o manuseio da amostra para manter a esterilidade (Brander *et al.*, 2020). As amostras foram cuidadosamente identificadas, seladas durante o processamento para evitar contaminação pelo ar e, posteriormente, transportadas com segurança para análise laboratorial. Além disso, para obter uma melhor compreensão de cada local de amostragem e seu contexto ambiental, os moradores foram entrevistados durante a coleta de amostras em relação aos sistemas de esgoto locais e às condições de abastecimento de água.

Filtração, identificação e caracterização de resíduos plásticos

Após a coleta, as amostras foram transportadas para o laboratório, onde 1 L de cada amostra foi filtrado usando um sistema de filtração a vácuo com membranas de acetato de celulose de 0,45 µm. As amostras filtradas foram então cuidadosamente identificadas e colocadas em placas de Petri seladas para evitar contaminação externa. A análise subsequente foi conduzida usando um estereomicroscópio Olympus SZX16, equipado com uma câmera digital DP73 e uma ampla taxa de zoom de 16,4:1, permitindo imagens de alta resolução. Observações detalhadas permitiram a quantificação e classificação de detritos plásticos com base na quantidade, tamanho, cor e forma (pallets, fibras, fragmentos, filmes ou espumas). Na ausência de legislação específica que estabeleça protocolos para coleta e análise de detritos plásticos em águas subterrâneas, a metodologia adotada neste estudo foi baseada nas abordagens descritas por Brožová *et al.* (2023) e Şener & Yabanli (2023).

Caracterização Química

A caracterização química dos resíduos filtrados foi realizada por meio de análise de espectroscopia no infravermelho utilizando um microFTIR Spectrum 3 com módulo Spotlight 200 (PerkinElmer). Os materiais filtrados foram transferidos para uma lâmina de KBr utilizando uma lupa Olympus SZX10. O microFTIR foi ajustado para o modo transmitância, utilizando uma resolução espectral de 1 cm^{-1} e uma faixa espectral de 4000 a 600 cm^{-1} . O tamanho e o formato da abertura foram ajustados de acordo com cada amostra, com dimensões variando de 25 a 150 μm . Os espectros obtidos foram comparados com a biblioteca de referência (Polímeros), utilizando-se o software PerkinElmer Spectrum IR (Versão 10.7.2); partículas cuja correspondência espectral com polímeros na biblioteca excedeu 60% foram consideradas Mps.

Análise Estatística

As análises estatísticas foram realizadas usando o software R (versão 3.5.2) e os gráficos foram criados usando o software GraphPadPrism (versão 10.2.1). A distribuição dos dados foi avaliada usando os testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homocedasticidade (Levene). Testes paramétricos (ANOVA e teste a posteriori de Dunn) e não paramétricos (Kruskal-Wallis e Mann-Whitney a posteriori pareados) foram realizados para comparar os resultados. A correção de Bonferroni foi aplicada para ajustar os níveis de significância em comparações múltiplas. As análises de Pearson foram usadas para avaliar a correlação linear da quantidade de detritos plásticos, determinando a força e a direção das associações. Testes qui-quadrado e testes de proporção foram realizados para comparar a proporção de diferentes características de detritos plásticos entre as áreas de amostragem. Um nível de significância de $p < 0,05$ foi estabelecido.

Resultados e Discussão

Neste estudo, detritos plásticos foram detectados 74% dos poços de água subterrânea analisados, com um total de 296 itens/L registrados em toda a região, variando de 13 a 63 itens/L por zona de amostragem. A Figura 17 apresenta a distribuição de detritos plásticos nas zonas de amostragem usando uma análise gráfica Box Plot.

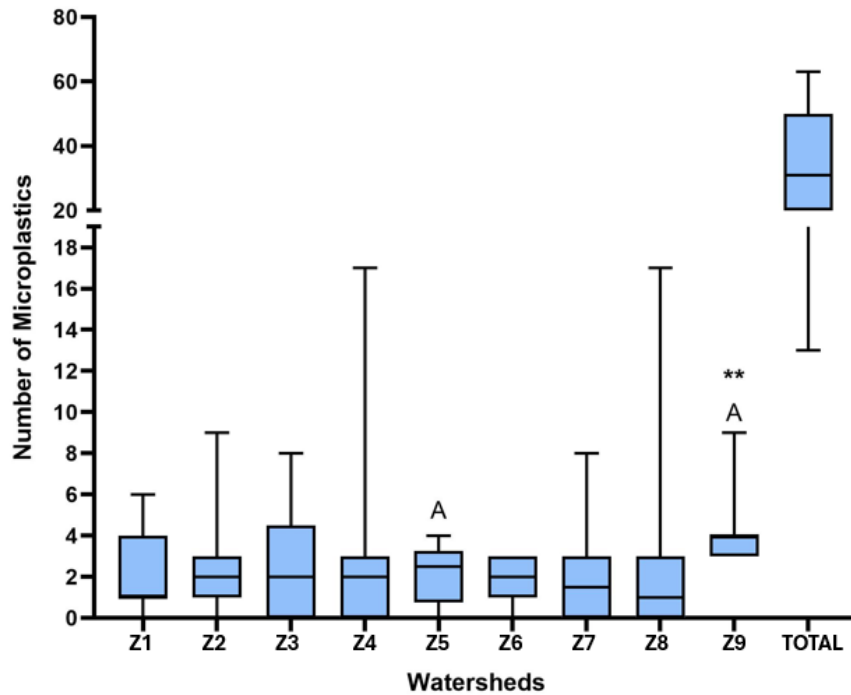


Figura 17 - Abundância de plástico detritos nas águas subterrâneas por zona amostrada, em Maricá (Rio de Janeiro, Brasil) (**: Medianas acima das demais; A: Quantidade acima dos demais).

A maior concentração de detritos plásticos (17 itens/L) e a maior dispersão foram observadas na Zona 4 (Z4). Não foram detectadas variações significativas nas medianas, exceto na Zona 1 (Z1), onde a mediana foi próxima de zero, e na Zona 9 (Z9), onde um número menor de poços amostrados apresentou maior presença de detritos. Apesar de um número maior de pontos de amostragem, outras zonas também apresentaram uma proporção considerável de poços de água subterrânea livres de micro ou macropelásticos, levando a medianas relativamente semelhantes. Estatisticamente, as zonas marcadas com a letra "A" (Z5 e Z9) foram equivalentes, embora a Z9 tenha apresentado uma concentração significativamente maior de detritos plásticos em comparação com outras zonas.

Em termos de concentrações médias, a Zona 9 (Z9) apresentou o maior nível de detritos plásticos (4,4 itens/L), enquanto a Zona 6 (Z6) registrou o menor (1,9 itens/L). Notavelmente, apesar de não estar entre as áreas mais densamente povoadas ou urbanizadas (Figura 2), a Z9 desempenha um papel crucial na interconexão entre o Sistema da Lagoa de Maricá e o mar através do canal permanente de Ponta Negra. Essa conectividade hidráulica sugere que a região pode atuar como um canal para o

transporte e disseminação de detritos plásticos, conforme observado por Alvarado-Zambrano *et al.* (2023). Especificamente, a Z9 pode servir tanto como um ponto de entrada para detritos plásticos marinhos quanto como um receptor de contaminantes plásticos originários do Sistema da Lagoa de Maricá, que se infiltram nas águas subterrâneas e se acumulam na área.

Além da influência da conectividade do corpo d'água e da intrusão de água do mar, outros fatores hidrogeológicos importantes contribuem para a contaminação das águas subterrâneas por plásticos. A permeabilidade e a porosidade do aquífero facilitam a migração vertical e horizontal de partículas plásticas da superfície para o solo (Shi *et al.*, 2023; Ranjan *et al.*, 2023). Além disso, a precipitação pode exacerbar o transporte e a dispersão de plástico, principalmente durante períodos de precipitação intensa (O'Connor *et al.*, 2019). De acordo com Perraki *et al.* (2024), várias variáveis hidrogeológicas, como recarga do aquífero via escoamento superficial, condutividade hidráulica, estrutura e espessura da zona vadosa, flutuações sazonais de recarga, interações água-solo e velocidade e profundidade do fluxo de água subterrânea influenciam ainda mais a mobilidade e o acúmulo de detritos plásticos em sistemas de águas subterrâneas.

Outro fator é o uso e a cobertura do solo da região, e as fontes podem ser difusas, como corpos d'água contaminados e deposição atmosférica (Ye *et al.*, 2023), ou específicas, como descarte incorreto de resíduos, chorume de aterros sanitários, descarga de lodo de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs) e águas cinzas de uso doméstico (Belkhiri *et al.*, 2022; Zubris & Richards, 2005; Bayo *et al.*, 2016). As águas residuais resultantes das atividades domésticas diárias podem conter componentes plásticos provenientes da abrasão da lavagem de roupas e tecidos em máquinas de lavar (onde fibras sintéticas presentes nos tecidos podem se soltar e ser lançadas na água), bem como pelo uso de produtos de limpeza e até mesmo cosméticos e produtos de higiene pessoal, que podem acabar contaminando as águas subterrâneas quando essas águas não são tratadas adequadamente (Browne *et al.*, 2011; Wagner *et al.*, 2014). Segundo estudo realizado por Liu *et al.* (2022), a presença de polímeros foi observada em uma fossa séptica amplamente utilizada em uma comunidade de 1.500 pessoas na China, onde foi possível concluir que os detritos plásticos apresentaram uma distribuição vertical clara nas fossas sépticas e que estas surgem como uma fonte significativa de uma variedade de Mps gerados durante as atividades humanas, quando

não gerenciados corretamente. Esse tipo de contaminação também foi levado em consideração nas investigações conduzidas por Lavoy & Crossman (2021) e Zhang *et al.* (2023), que detectaram a presença de polímeros em resíduos de fossas sépticas. O movimento de outras fibras, como o amianto, foi identificado à medida que se moviam por camadas substanciais de solo, conforme evidenciado por Mohanty *et al.* (2021), sugerindo que a discussão sobre o transporte de fibras sintéticas, incluindo polímeros, também pode ser considerada com base nessas observações.

Além do descarte inadequado de resíduos na região de Maricá, dados sobre saneamento, coletados por meio de questionários de moradores durante a amostragem, corroboram as fontes potenciais de Mps na área de estudo. A maioria dos entrevistados (68%) indicou que seu método primário de descarte de esgoto é uma fossa, com 80% das famílias sem acesso a um sistema formal de esgoto (Figura 18). Essa descoberta está alinhada com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021), que relata que apenas 4,53% da população total de Maricá tem acesso a serviços de esgoto, bem abaixo da média estadual de 71,29% e da média nacional de 66,5%.

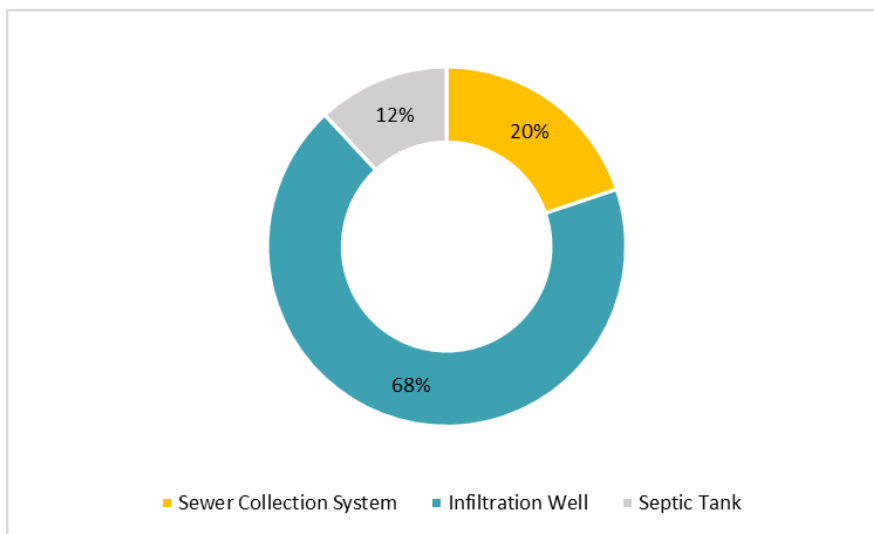


Figura 18 - Descarte final de doméstico esgoto baseado sobre dados obtidos através de questionário.

Em relação ao consumo de água, as respostas ao questionário revelaram que uma pequena porcentagem de moradores (11%) depende de poços de água subterrânea para beber ou cozinhar. No entanto, apesar desse uso direto limitado, a contaminação continua sendo uma preocupação significativa de saúde pública, pois a exposição a polímeros plásticos pode representar riscos para a população local.

A presença de partículas plásticas em águas subterrâneas continua sendo um tópico pouco explorado globalmente, com poucos estudos abordando essa questão. Além disso, variações nas metodologias de amostragem e analíticas complicam as comparações entre os estudos, dificultando uma compreensão abrangente da extensão e do impacto da contaminação plástica em sistemas de águas subterrâneas. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam um resumo dos principais estudos sobre esse tópico e suas principais descobertas.

Tabela 2 - Refrências de artigos sobre contaminação de Mps no mundo.

País	Abundância (itens /L)	Tipo de plástico predominante	Tamanho (µm)	Cor Prevalente	Referência
EUA	0 a 15,2	Fibras	<1250	Transparente e branco	Pano <i>e outros</i> (2019)
Checo República	2,5 a 20	Fibras	<1000	Azul e cinza	Brožková <i>e outros</i> (2023)
Austrália	16 a 97	Fragmentos	18 a 491	ND	Samandra <i>e outros</i> (2022)
China	0 a 44	Fibras	200	Azul e transparente	Wu <i>e outros</i> (2022)
Itália	12 a 54	Fibras	<1000	Transparente	Balestra e Bellope (2023)
Índia	0 a 2,8	Nylon	10 a 500	Branco e preto	Maniocas <i>e outros</i> (2021)
Índia	12 a 2500	Nylon	120 a 2500	Transparente	Selvam <i>e outros</i> (2021)
Irã	0 a 0,13	Fibras	ND	ND	Esfandiari (2023)
Coréia	0,006 a 0,192	Fragmentos	20 a 100	ND	Kim <i>e outros</i> (2023)
México	10 a 34	ND	63 a 1002	Azul e preto	Alvarado-Zambrano <i>et al.</i> (2023)
Grécia	16 a 513	Fragmentos	>25	Azul	Peraki <i>e outros</i> (2024)
Brasil	13 a 63	Fibras	1000 a 3500	Azul	Pompermyer <i>e outros</i> (2024)

ND – Não disponível

Brožová *et al.* (2023) investigaram concentrações de detritos plásticos em poços de águas subterrâneas na região da Morávia-Silésia da República Tcheca, relatando valores variando de 2,5 a 20 partículas/L. Esta região densamente povoada, com aproximadamente um milhão de residentes, foi fortemente impactada pela mineração de carvão e atividades industriais. Nos Estados Unidos, Panno *et al.* (2019) estudaram nascentes e poços dentro de dois aquíferos cársticos e identificaram fibras microplásticas, com uma concentração máxima de 15,2 partículas/L.

No sul da Índia, Selvam *et al.* (2021) examinaram o papel dos Mps como vetores de poluição por metais pesados em águas subterrâneas, observando uma concentração máxima de 10,1 partículas/L, embora algumas amostras não contivessem Mps detectáveis. Por outro lado, estudos em regiões altamente povoadas da Índia (Manikanda *et al.*, 2021) e Austrália (Samandra *et al.*, 2022) relataram concentrações máximas de 80 partículas/L e 97 partículas/L, respectivamente — valores comparáveis aos encontrados no presente estudo. Notavelmente, Samandra *et al.* (2022) analisaram águas subterrâneas de um aquífero sedimentar aluvial, onde diversas atividades antropogênicas provavelmente contribuíram para a contaminação por Mps.

Perraki *et al.* (2024) documentaram concentrações de microplástico ainda maiores no sudeste da Ática, Grécia, com valores variando de 16 a 513 partículas/L. Seu estudo também revelou que aquíferos freáticos mais rasos continham concentrações de microplástico maiores do que poços mais profundos, provavelmente devido à maior influência antropogênica e a uma profundidade de infiltração limitada de apenas alguns metros.

As amostras analisadas revelaram a presença de polímeros com variações de forma, cor e tamanho. Duas categorias morfológicas primárias foram identificadas: fibras e fragmentos (Figura 19), que representaram 96,4% e 3,6% do total de detritos plásticos, respectivamente (Figura 20). De acordo com Mohanty *et al.* (2021), a predominância de fibras pode ser atribuída aos padrões de uso específicos do local e ao seu formato cilíndrico, o que facilita o transporte e a dispersão em ambientes aquáticos. Essas descobertas são consistentes com estudos anteriores que também relataram uma maior abundância de fibras em comparação aos fragmentos em águas subterrâneas, conforme resumido na Tabela 2.

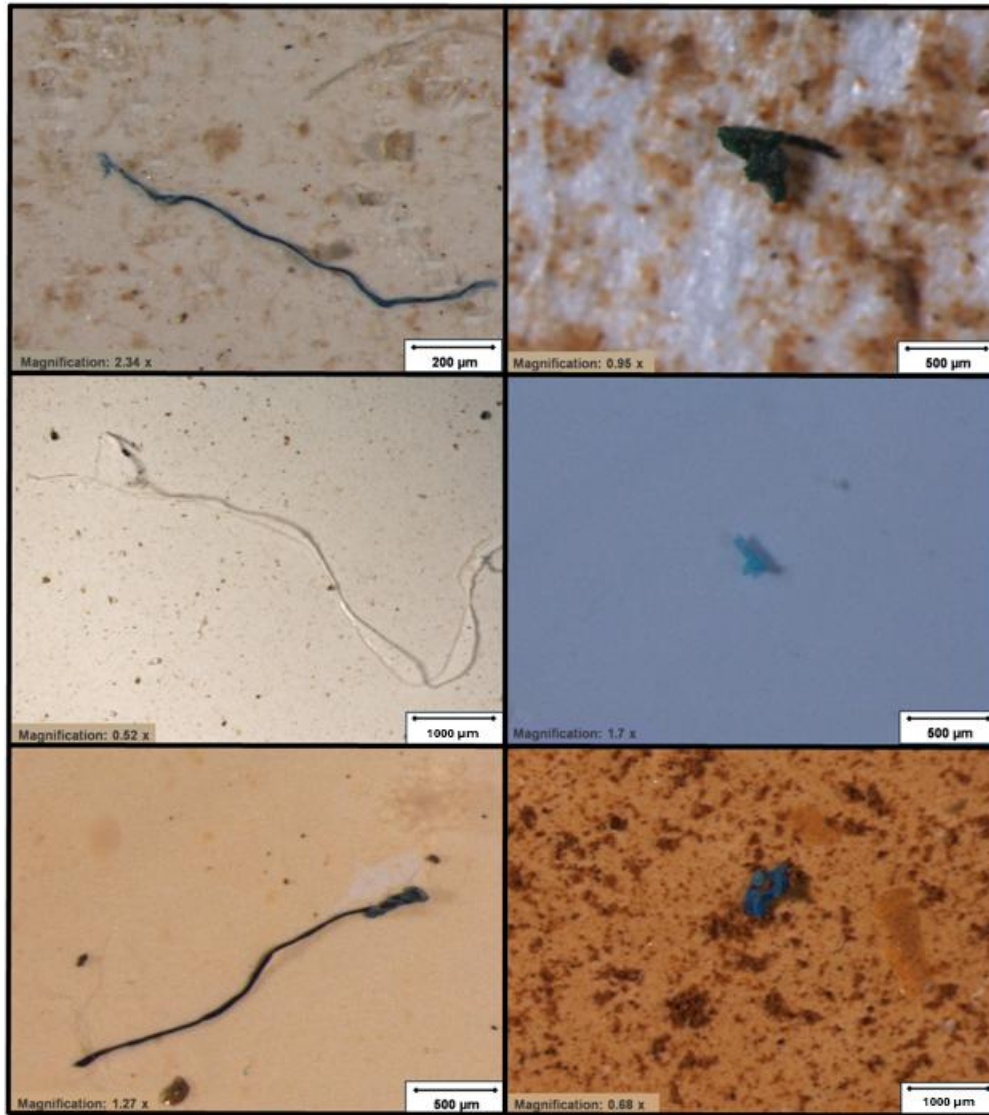


Figura 19 - Representativo fotografico de detritos plástico (fibras e fragmentos) identificados em águas subterrâneas , Maricá (Rio de Janeiro, Brasil).

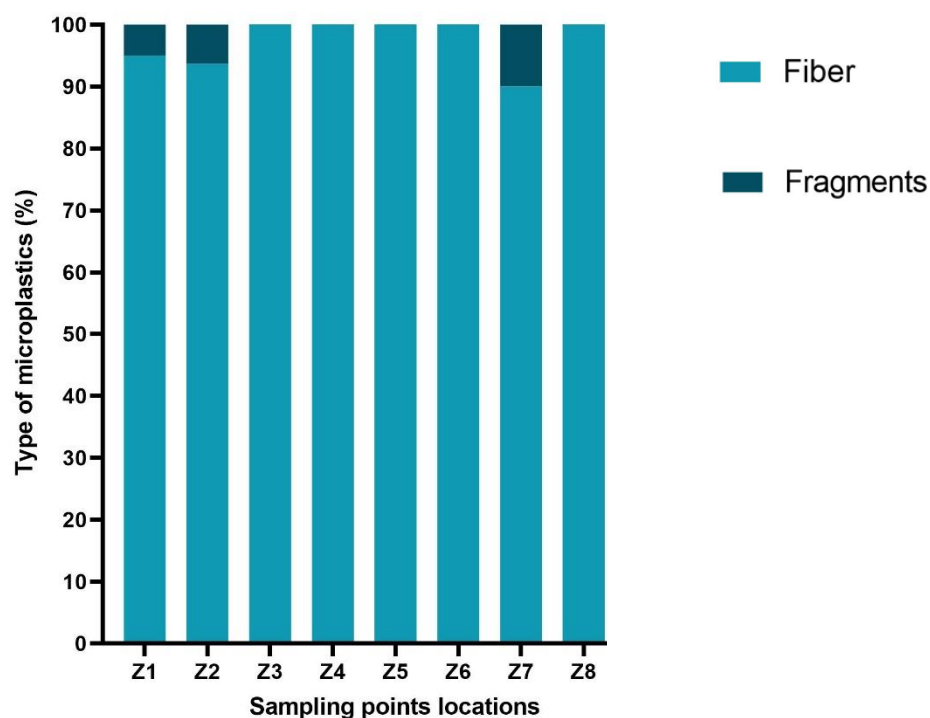


Figura 20 - Tipos de Mps encontrados nas zonas amostradas.

A análise colorimétrica serve como uma ferramenta valiosa para identificar potenciais fontes de detritos plásticos. Os fragmentos apresentaram predominantemente uma cor transparente (50%), seguida de verde (30%) e azul (20%). Em contraste, as fibras apresentaram maior variabilidade de cor, sendo o azul o mais prevalente (50%), seguido do transparente (32,5%), corroborando os achados de Wu *et al.* (2022). Uma porcentagem notável de fibras pretas e vermelhas também foi observada, embora em quantidades menores. A presença de uma película transparente foi detectada em apenas dois pontos de amostragem, representando 1% do total de amostras. Uma análise detalhada de todas as zonas de estudo revelou uma maior variedade de cores nas fibras das zonas Z2 e Z5 (Figura 21).

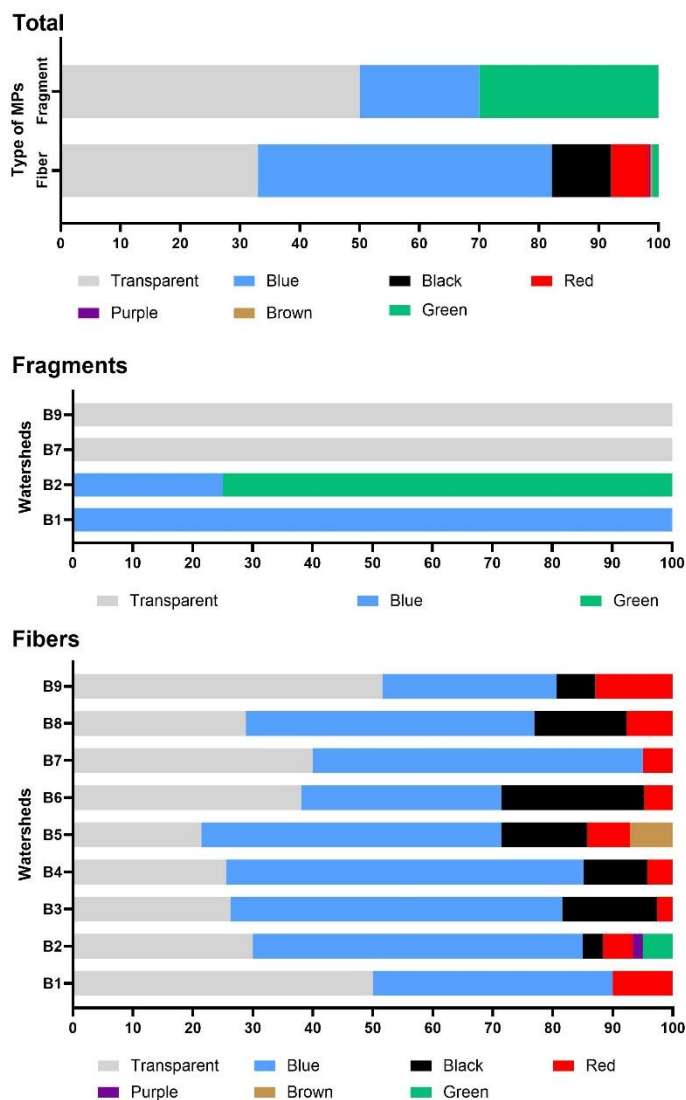


Figura 21 - Variedade de detritos plástico cores por zonas amostradas.

De acordo com Zhao *et al.* (2022), os plásticos azuis se degradam mais rapidamente sob exposição solar devido à sua ineficiência na absorção de luz UV, resultando em uma maior presença ambiental em comparação aos plásticos vermelhos e amarelos. Esse processo de degradação acelerado ocorre porque os pigmentos azuis não conseguem dissipar efetivamente a energia da luz UV, levando à formação de partículas menores.

Em relação à distribuição do tamanho das partículas (Figura 22), todos os fragmentos identificados eram menores que 2,6 mm, com a faixa de tamanho mais comum sendo de 1–2 mm, representando 60% do total de fragmentos. As fibras exibiram uma faixa de tamanho mais ampla, com as maiores proporções caindo entre 1,0–2,0 mm (29,37%) e 2,0–3,5 mm (27,97%), correspondendo a 84 e 80 itens, respectivamente.

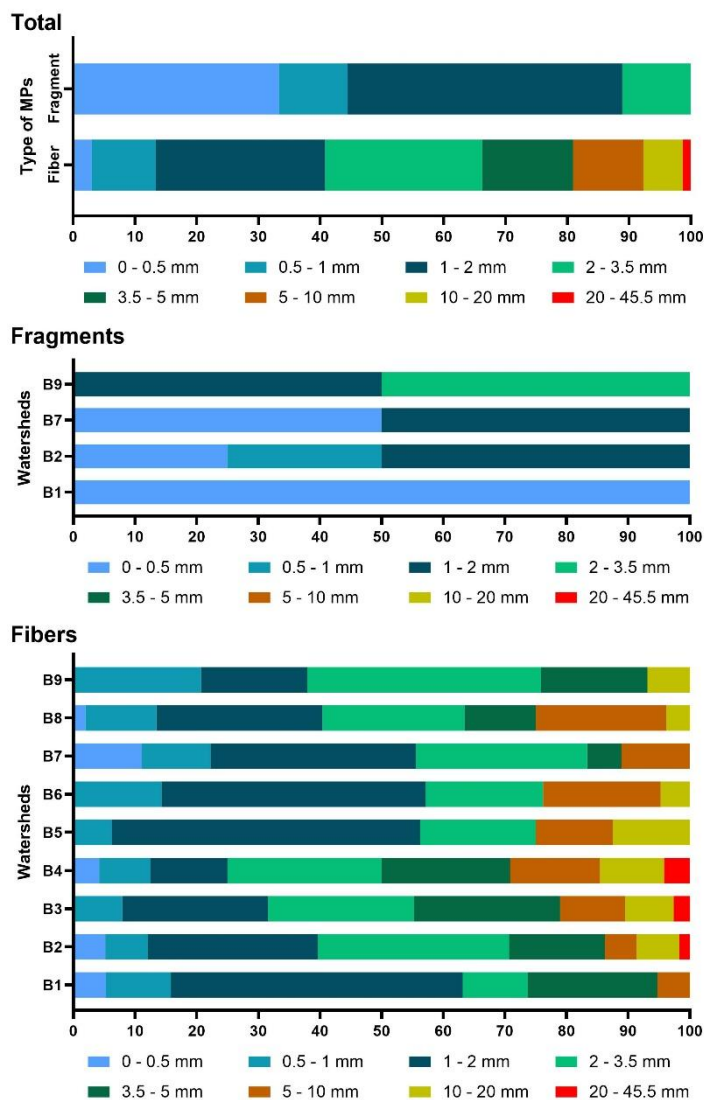


Figura 22 - Tamanho distribuição de detritos plástico por zonas amostradas.

De acordo com a definição de Kim *et al.* (2020), 26 itens (41,3%) foram classificados como Mps, exibindo dimensões menores que 5,0 mm. O menor detrito identificado foi uma fibra minúscula medindo 0,24 mm em Z7. Os 37 itens restantes (58,7%) excederam 5,0 mm de comprimento, categorizando-os como mesoplásticos (5–25 mm) e macropásticos (>25 mm), com o maior espécime registrado sendo uma fibra medindo 45,6 mm de comprimento em Z4.

A caracterização química é crucial para distinguir Mps de materiais naturais, pois fornece confirmação definitiva de sua origem antropogênica. Para verificar se os Mps suspeitos identificados na caracterização física se alinham com a composição química de polímeros sintéticos, cinco pontos de amostragem por zona foram selecionados, somando um total de 45 partículas levadas para análise usando

Espectroscopia de infravermelho com transformada de micro-Fourier (μ FTIR) (Figura 23).

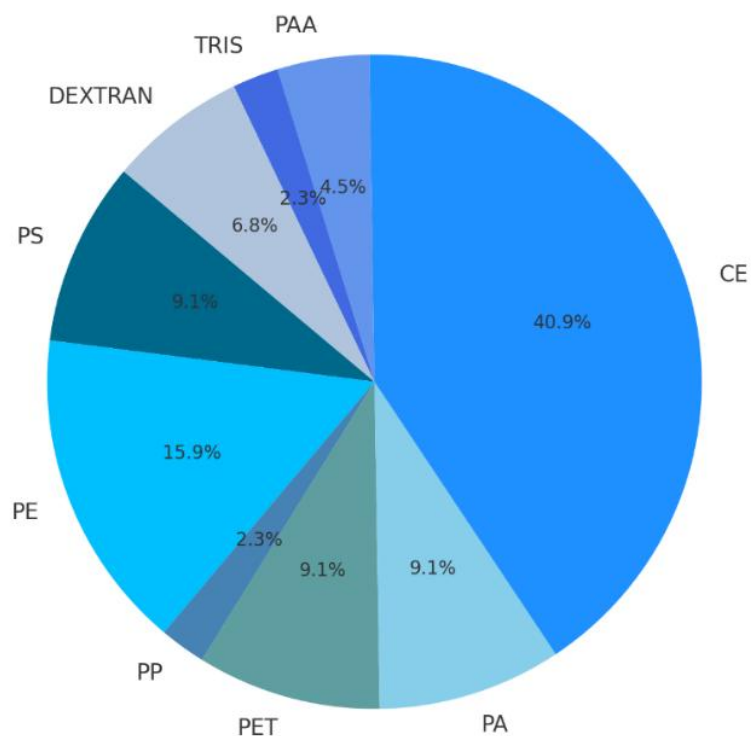


Figura 23 - Porcentagem representação de partícula tipos identificados através da análise μ FTIR.

Das 45 partículas analisadas, 18 foram identificadas como celulose, representando aproximadamente 40% do total (Figura 23). Embora a celulose seja um material de ocorrência natural, ela também pode ter origem antropogênica, particularmente em suas formas tingidas ou quimicamente modificadas. A Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) permite a diferenciação entre celulose natural e alterada, pois a celulose natural exibe um espectro uniforme, enquanto a celulose antropogênica frequentemente apresenta bandas espectrais adicionais ou modificações devido a tratamentos químicos ou contaminantes industriais (Garside & Wyeth, 2003).

Semelhante aos achados de Baraza & Hasenmueller (2023) e Sforzi *et al.* (2024), a celulose foi o tipo de micropartícula (MP) mais frequentemente detectado. Entre as 18 amostras classificadas como celulose, 17% exibiram variações espectrais consistentes com celulose quimicamente alterada, sugerindo uma origem antropogênica. Essas variações são evidentes nas diferenças espectrais e padrões de coloração mostrados na Figura 8 (b)-1 e (b)-2.

Consistente com estudos anteriores (Purushothaman *et al.*, 2023; Balestra *et al.*, 2023; Wan *et al.*, 2022), os Mps derivados de plástico mais comumente identificados neste estudo foram o polietileno (PE) (Figura 7), um polímero amplamente utilizado na produção de embalagens e sacolas plásticas. Em seguida, vieram o poliestireno (PS), o tereftalato de polietileno (PET) e a poliamida/nylon (PA), cada um representando 9,1% do total de detritos plásticos identificados. Esses resultados estão alinhados com a pesquisa conduzida por Samandra *et al.* (2022).

Além disso, foi detectada a presença de tris (dipropilenoglicol) fosfito, um aditivo plástico. Este composto é comumente usado como um estabilizador químico em materiais poliméricos, com sua aplicação primária como um retardante de chamas (Yang *et al.*, 2023; Tong *et al.*, 2021). Embora identificado em quantidades menores (2,5%), sua detecção se alinha com as descobertas de Cao *et al.* (2022), indicando a dispersão ambiental de aditivos plásticos.

O poliacrilato de sódio (PAA), um polímero superabsorvente amplamente utilizado em produtos de higiene e cuidados pessoais, foi identificado em 4,5% das amostras analisadas. Sua presença destaca o impacto ambiental do descarte inadequado de produtos de consumo diário (Somers *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2019). Embora atualmente não haja estudos específicos investigando a contaminação por PAA em águas subterrâneas, pesquisas anteriores detectaram partículas de PAA em outras fontes, como água da torneira (Yang *et al.*, 2014) e, mais recentemente, no solo (Ramaremissa, Tutu, & Saad, 2024).

Dextrano, um polissacarídeo amplamente utilizado nas indústrias médica e farmacêutica, é aplicado principalmente em soluções intravenosas e como estabilizador em sistemas de liberação controlada de medicamentos devido à sua solubilidade em água e rápida biodegradabilidade (Chen *et al.*, 2024). Neste estudo, o dextrano foi identificado como um biopolímero e, pela primeira vez, vinculado à presença de micropartículas (Mps) em águas subterrâneas. Esta descoberta levanta questões importantes: ou a biodegradação do dextrano não ocorre tão rapidamente quanto se supunha anteriormente, ou suas características físicas — como tamanho e forma — aumentam sua mobilidade através dos grãos do solo, permitindo que ele alcance o ambiente aquático subterrâneo.

A composição química da água subterrânea é influenciada principalmente pelas propriedades da água infiltrada, interações químicas dentro do aquífero e a natureza das

formações geológicas. Fatores adicionais como profundidade do aquífero, cobertura vegetal, padrões de uso da terra e variações sazonais também desempenham um papel crucial na formação da química da água subterrânea. A interação dessas variáveis resulta em composições diversas da água subterrânea, influenciando tanto a qualidade natural da água quanto o transporte potencial de contaminantes (Maroubo *et al.*, 2021).

A pesquisa de Publio *et al.* (2023) investigou os mesmos pontos analisados neste estudo e revelou níveis alarmantes de contaminação das águas subterrâneas em Maricá, principalmente devido ao descarte inadequado de efluentes e à falta de infraestrutura de saneamento básico. Altas concentrações de nitratos (>10 mg/L em 30% das amostras analisadas), carbono orgânico dissolvido (até 5 mg/L em áreas específicas) e contaminação microbiológica, coliformes termotolerantes detectados em 65% das amostras excederam os limites estabelecidos para o consumo humano. Essas descobertas são consistentes com a poluição de esgoto doméstico e se alinham com a contaminação por Mps observada nas águas subterrâneas da região. A pesquisa ressalta o risco de migração de contaminantes para aquíferos locais, particularmente em áreas com alta permeabilidade do solo.

Entre as zonas analisadas, Z9 exibiu a maior quantidade total de detritos plásticos, seguida de perto por Z5. A diversidade de cores e tamanhos foi maior para fibras do que para fragmentos, refletindo sua maior abundância geral. Detritos plásticos azuis e transparentes foram significativamente mais prevalentes em todas as zonas em comparação com outras cores ($p < 0,05$). Da mesma forma, detritos plásticos variando de 1 a 3,5 mm de tamanho dominaram em todas as zonas de coleta e na amostra total ($p < 0,05$). A distribuição de cores variou significativamente entre as zonas de coleta, particularmente para detritos transparentes, azuis e pretos, tanto em fibras quanto na contagem total de detritos plásticos.

Para detritos plásticos transparentes, Z2 exibiu quantidades maiores que Z5, Z6 e Z7; Z4 teve uma quantidade maior que Z5; e Z5 continha mais que Z8 e Z9. No geral, as comparações entre zonas revelaram variações significativas nas quantidades de detritos plásticos azuis e pretos ($p < 0,05$), com todas as zonas diferindo em suas quantidades de detritos plásticos azuis. Além disso, Z1, Z3, Z7 e Z8 exibiram variações significativas no acúmulo de detritos plásticos pretos.

Considerações finais

Este estudo documentou a presença e caracterização de detritos plásticos em águas subterrâneas no município de Maricá, situado na Região dos Lagos do Rio de Janeiro, expandindo o escopo de pesquisas anteriores ao incorporar novas zonas de amostragem. Entre os 126 poços analisados, 94 exibiram evidências de contaminação, com densidades de detritos variando de 13 a 63 itens/L por zona. Das 45 partículas analisadas usando μ FTIR, pelo menos 35 foram confirmadas como Mps ou compostos derivados de plástico.

Essas descobertas destacam uma preocupação ambiental emergente e pouco explorada, ressaltando a necessidade urgente de sistemas de tratamento de águas residuais capazes de filtrar e remover efetivamente os detritos plásticos antes que eles entrem no ambiente. Apesar dos avanços nas tecnologias de filtragem de Mps, ainda há desafios para garantir sua acessibilidade e viabilidade econômica, principalmente para aplicações domésticas.

Além de identificar a contaminação por plástico, este estudo serve como um alerta sobre a necessidade de consumo responsável de plástico e descarte adequado de resíduos. Investir em alternativas sustentáveis e aumentar a conscientização pública sobre os impactos da poluição por plástico são medidas essenciais para mitigar a contaminação das águas subterrâneas. Os dados apresentados aqui não apenas estabelecem uma base para pesquisas futuras, mas também fornecem insights importantes para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias aprimoradas de gerenciamento de resíduos. Preservar os recursos hídricos subterrâneos é imperativo — não apenas para Maricá, mas para todas as áreas urbanas que enfrentam ameaças ambientais semelhantes.

Referências

ALMEIDA, M. P. *et al.* The Complex Dynamics of Microplastic Migration through Different Aquatic Environments: Subsidies for a Better Understanding of Its Environmental Dispersion. *Microplastics*, v. 2, n. 1, p. 62–77, 2023. <https://doi.org/10.3390/microplastics2010005>

ALVARADO-ZAMBRANO, D.; RIVERA-HERNÁNDEZ, J. R.; GREEN-RUIZ, C. First insight into microplastic groundwater pollution in Latin America: the case of a coastal aquifer in Northwest Mexico. *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 30, n. 29, p. 73600–73611, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27461-9>

BALESTRA, Valentina et al. Preliminary investigations of microplastic pollution in karst systems, from surface watercourses to cave waters. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 252, p. 104117, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104117>

BRANDER, Susanne M. et al. Sampling and quality assurance and quality control: a guide for scientists investigating the occurrence of microplastics across matrices. *Applied Spectroscopy*, v. 74, n. 9, p. 1099-1125, 2020. <https://doi.org/10.1177/00037028209457>

BARAZA, Teresa; HASENMUELLER, Elizabeth A. Floods enhance the abundance and diversity of anthropogenic microparticles (including microplastics and treated cellulose) transported through karst systems. *Water Research*, v. 242, p. 120204, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120204>

BALESTRA, V.; BELLOPEDE, R. Microplastics in caves: A new threat in the most famous geo-heritage in the world. Analysis and comparison of Italian show caves deposits. *Journal of Environmental Management*, v. 342, p. 118189, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118189>

BELKHIRI, A. H.; CARRE, F.; QUIOT, F. State of knowledge and future research needs on microplastics in groundwater. *Journal of Water and Health*, v. 20, n. 10, p. 1479–1496, 2022. <https://doi.org/10.2166/wh.2022.048>

BROWNE, M. A. et al. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, v. 45, n. 21, p. 9175–9179, 2011. <https://doi.org/10.1021/es201811s>

BROŽOVÁ, K. et al. The first evidence of microplastic occurrence in mine water: The largest black coal mining area in the Czech Republic. *Water Research*, v. 244, p. 120538, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120538>

CAMPOY, Pedro; BEIRAS, Ricardo. Review: Ecological effects of macro-, meso- and microplastics. “Revisión: Efectos ecológicos de macro-, meso-y microplásticos”. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 189, n. 11, p. 581, 2019. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36814.89926>

CAO, Jing et al. Accumulation of microplastics and Tcep pollutants in agricultural soil: Exploring the links between metabolites and gut microbiota in earthworm homeostasis. *Environment International*, v. 170, p. 107590, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107590>

- CARPENTER, E. J.; SMITH, K. L.** Plastics on the Sargasso Sea Surface. *Science*, v. 175, n. 4027, p. 1240–1241, 1972. <https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240>
- CHEN, Ziwei et al.** Microbial dextran-hydrolyzing enzyme: Properties, structural features, and versatile applications. *Food Chemistry*, v. 437, p. 137951, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137951>
- CHIA, R. W. et al.** Microplastic pollution in soil and groundwater: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 19, n. 6, p. 4211–4224, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01297-6>
- CRUZ, A.; JR, G. C. DA S.; ALMEIDA, G. DE M.** Hydrogeochemical modeling of the phreatic aquifer of the Piratininga sandbank. “Modelagem hidrogeoquímica do aquífero freático da restinga de Piratininga, Niterói-RJ”. *Águas Subterrâneas*, 2006.
- CRUZ, C. B. M. et al.** Environmental impacts on the Maricá-Guarapina lagoon system. 1996. “Impactos ambientais no sistema lagunar de Maricá-Guarapina”. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 137-141
- EGER, G.; SILVA JUNIOR, G.; CRISTO, V.** Hydrodynamic Aspects, Water Balance and Flow Simulation in the Itaipuaçu Coastal Aquifer, Maricá. “Aspectos Hidrodinâmicos, Balanço Hídrico e Simulação de Fluxo no Aquífero Costeiro de Itaipuaçu, Maricá – Rio de Janeiro, Brasil”. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 36, p. 105–116, 2013. <http://hdl.handle.net/11422/18098>
- ESFANDIARI, A. et al.** Distribution and transport of microplastics in groundwater (Shiraz aquifer, southwest Iran). *Water Research*, v. 220, p. 118622, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118622>
- Instituto Água e Saneamento.** Maricá-RJ. 2022. Available at: [https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/rj/marica#:~:text=TIPO%20DE%20ESGOTAMENTO%20SANIT%C3%81RIO%20\(CENSO,n%C3%A3o%20t%C3%AAm%20banheiros%20nem%20sanit%C3%A1rios](https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/rj/marica#:~:text=TIPO%20DE%20ESGOTAMENTO%20SANIT%C3%81RIO%20(CENSO,n%C3%A3o%20t%C3%AAm%20banheiros%20nem%20sanit%C3%A1rios). Accessed in: April 2023.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** National survey on basic sanitation - Maricá-RJ. “Pesquisa nacional de saneamento básico - Maricá-RJ”. 2017. Available at: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/marica/pesquisa/30/84366>. Accessed in: April 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Maricá - Panorama. “Maricá - Panorama” 2024. Available at: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/marica/panorama>. Accessed in: Março de 2025.

ISSAC, M. N.; KANDASUBRAMANIAN, B. Effect of microplastics in water and aquatic systems. *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 28, n. 16, p. 19544–19562, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13184-2>

KIM, Y.-I. et al. Microplastic contamination in groundwater on a volcanic Jeju Island of Korea. *Environmental Research*, v. 226, p. 115682, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115682>

KIM, Y.-N.; YOON, J.-H.; KIM, K.-H. J. Microplastic contamination in soil environment – a review. *Soil Science Annual*, v. 71, n. 4, p. 300–308, 2020. <https://doi.org/10.37501/soilsa/131646>

LAVOY, M.; CROSSMAN, J. A novel method for organic matter removal from samples containing microplastics. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, v. 286, p. 117357, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117357>

LIU, N. et al. Characterization of microplastics in the septic tank via laser direct infrared spectroscopy. *Water Research*, v. 226, p. 119293, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119293>

LIU, Kai et al. Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Science of the Total Environment*, v. 675, p. 462-471, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110>

MANIKANDA BHARATH, K. et al. Spatial distribution of microplastic concentration around landfill sites and its potential risk on groundwater. *Chemosphere*, v. 277, p. 130263, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130263>

MOHANTY, S. K.; SALAMATIPOUR, A.; WILLENBRING, J. K. Mobility of asbestos fibers below ground is enhanced by dissolved organic matter from soil amendments. *Journal of Hazardous Materials Letters*, v. 2, p. 100015, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2021.100015>

Maroubó, L. A., Moreira-Silva, M. R., Teixeira, J. J., & Teixeira, M. F. S. Influence of Rainfall Seasonality in Groundwater Chemistry at Western Region of São Paulo State—Brazil. 2021. *Water*, 13(11), 1450. <https://doi.org/10.3390/w13111450>

Municipality of Maricá. Marica Socioeconomic Panorama. “Maricá Socioeconomic Panorama”. 2022. Available at: <https://idr.marica.rj.gov.br/wp-content/uploads/2024/12/Panorama-socioeconomico-de-Marica.pdf>.

O’CONNOR, D. et al. Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles. *Environmental Pollution*, v. 249, p. 527–534, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.092>

PAN, Y. et al. Removing microplastics from aquatic environments: A critical review. *Environmental Science and Ecotechnology*, v. 13, p. 100222, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2022.100222>

PANNO, S. V. et al. Microplastic Contamination in Karst Groundwater Systems. *Ground Water*, v. 57, n. 2, p. 189–196, 2019. <https://doi.org/10.1111/gwat.12862>

PERRAKI, M. et al. Identification of Microplastics Using μ -Raman Spectroscopy in Surface and Groundwater Bodies of SE Attica, Greece. *Water*, v. 16, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16060843>

PUBLIO, Maria Cristina M. et al. Assessment of Groundwater Contamination in the Southeastern Coast of Brazil: A Potential Threat to Human Health in Marica Municipality. *Eng*, v. 4, n. 4, p. 2640-2655, 2023. <https://doi.org/10.3390/eng4040151>

PURUSHOTHAMAN, Aishwarya et al. Patterns and variability in the microplastic contamination along the southwest coast of India with emphasis on submarine groundwater discharge sites. *Marine Pollution Bulletin*, v. 194, p. 115432, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115432>

RAMAREMISA, Gibbon; TUTU, Hlanganani; SAAD, Dalia. Detection and characterisation of microplastics in tap water from Gauteng, South Africa. *Chemosphere*, v. 356, p. 141903, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141903>

RANJAN, V. P. et al. Preliminary investigation on effects of size, polymer type, and surface behaviour on the vertical mobility of microplastics in a porous media. *Science of The Total Environment*, v. 864, p. 161148, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161148>

REIS, J. C. M.; ROSAS, R. O. Groundwater protection as a source of resilience and a tool for disaster risk reduction in the municipality of Maricá–RJ. “A proteção das águas

subterrâneas como fonte de resiliência e ferramenta de redução de risco de desastres no município de Maricá–RJ”. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 8, n. 3, p. 328–342, 2022. <https://doi.org/10.51891/rease.v8i3.4579>

SAMANDRA, S. et al. Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia. *Science of The Total Environment*, v. 802, p. 149727, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149727>

SELVAM, S. et al. Hazardous microplastic characteristics and its role as a vector of heavy metal in groundwater and surface water of coastal south India. *Journal of Hazardous Materials*, v. 402, p. 123786, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123786>

ŞENER, İ.; YABANLI, M. Macro- and microplastic abundance from recreational beaches along the South Aegean Sea (Türkiye). *Marine Pollution Bulletin*, v. 194, p. 115329, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115329>

SHI, W. et al. A global review on the abundance and threats of microplastics in soils to terrestrial ecosystem and human health. *The Science of the Total Environment*, v. 912, p. 169469, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169469>

SILVESTRE, C. P. et al. Geomorfologia, sedimentação e processos atuantes na lagoa de Maricá, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18, n. 2, 2017. DOI: [10.20502/rbg.v18i2.1111](https://doi.org/10.20502/rbg.v18i2.1111)

TONG, Yi et al. In situ localization of Tris (2, 3-dibromopropyl) isocyanurate in mouse organs by MALDI-IMS with auxiliary matrix strategy. *Talanta*, v. 235, p. 122723, 2021. DOI: [10.1016/j.talanta.2021.122723](https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122723)

VIAROLI, S.; LANCIA, M.; RE, V. Microplastics contamination of groundwater: Current evidence and future perspectives. A review. *The Science of the Total Environment*, v. 824, p. 153851, 2022. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.153851](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153851)

WAGNER, M. et al. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. *Environmental Sciences Europe*, v. 26, n. 1, p. 12, 2014. DOI: [10.1186/s12302-014-0012-7](https://doi.org/10.1186/s12302-014-0012-7)

WU, X. et al. Wastewater treatment plants act as essential sources of microplastic formation in aquatic environments: A critical review. *Water Research*, v. 221, p. 118825, 2022. DOI: [10.1016/j.watres.2022.118825](https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118825)

YANG, Chenyu *et al.* Efficient removal of Tris (2-chloroethyl) phosphate by biochar derived from shrimp shell: adsorption performance and mechanism study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 254, p. 114728, 2023. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2023.114728](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114728)

YANG, Changqiao *et al.* Micropartículas de politetrafluoroetileno dispersíveis em água preparadas por enxerto de poli(ácido acrílico). *Radiation Physics and Chemistry*, v. 103, p. 103-107, 2014. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2014.05.051](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.05.051)

YE, Zi *et al.* 3D elastodynamic solutions to layered transversely isotropic soils considering the groundwater level. *Computers and Geotechnics*, v. 158, p. 105354, 2023. DOI: [10.1016/j.compgeo.2023.105354](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105354)

ZHANG, Shengbo *et al.* Recent advances in plastic recycling and upgrading under mild conditions. *Green Chemistry*, 2023. DOI: [10.1039/D3GC01872E](https://doi.org/10.1039/D3GC01872E)

ZHANG, X. *et al.* Microplastics in household fecal sewage treatment facilities of rural China. *Journal of Hazardous Materials*, v. 448, p. 130925, 2023. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2023.130925](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130925)

ZHAO, H. *et al.* Pollution status of microplastics in the freshwater environment of China: a mini review. *Water Emerging Contaminants & Nanoplastics*, v. 1, 2022. DOI: [10.20517/wecn.2021.05](https://doi.org/10.20517/wecn.2021.05)

ZUBRIS, K. A. V.; RICHARDS, B. K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, v. 138, n. 2, p. 201–211, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.04.013>

7 Considerações Finais

Esta pesquisa expôs evidências de que a poluição por microplásticos em águas subterrâneas é um problema real, porém pouco explorado, especialmente na América Latina. O levantamento bibliográfico realizado mostrou déficit em estudos sobre contaminação por microplástico em aquíferos, contrastando com o crescente número de publicações sobre ambientes marinhos e de superfície. A carência de dados representa não só uma lacuna científica, mas também um obstáculo à criação de políticas públicas para o monitoramento e a proteção desses recursos.

O estudo de caso realizado na região de Maricá, ajudou significativamente a preencher parte dessa lacuna. A análise de 126 poços revelou a presença de partículas plásticas em 94 amostras, com concentrações variando de 13 a 63 itens por litro. Esses valores, embora variáveis, apontam para um nível de contaminação importante em um ambiente naturalmente protegido, cuja vulnerabilidade tem sido historicamente desvalorizada.

A forma das partículas encontradas reforça essa ideia: 96,4% dos microplásticos identificados tinham formato de fibra, principalmente na cor azul. Esse padrão sugere a presença de restos de tecidos, provavelmente originários da lavagem de roupas sintéticas, de esgoto doméstico não tratado ou de infiltrações de fossas sépticas e redes de esgoto deficientes. O predomínio de fibras sintéticas em ambientes subterrâneos é especialmente preocupante, devido à sua capacidade de reter poluentes químicos e transportar microrganismos prejudiciais.

Quanto à distribuição por tamanho, verificou-se que 41,3% das partículas eram classificadas como microplásticos (menores que 5 mm), enquanto 58,7% eram meso e macropelásticos. Essa evidência é importante pois indica tanto a ocorrência de fragmentação de resíduos maiores no ambiente quanto a entrada direta de partículas grandes pelo solo.

A análise química por μ FTIR, aplicada em 45 partículas escolhidas, ofereceu informações valiosas sobre a composição dos elementos encontrados. A celulose foi o polímero mais comum, achado em 40% das partículas investigadas. Mesmo sendo um polímero natural, sua identificação como fibra sugere que pode agir de forma similar às partículas sintéticas, especialmente por poderem estar ligados a aditivos industriais ou na capacidade de carregar contaminantes. Entre os polímeros sintéticos, o PE foi o mais encontrado (15,9%), seguido pela PA, PET e pelo PS, cada um representando 9,1% das

ocorrências. Esses materiais estão muito ligados a embalagens, tecidos e utensílios plásticos descartáveis, indicando fontes variadas e constantes de poluição plástica no ambiente subterrâneo.

Portanto, os resultados aqui obtidos, indicam não apenas a contaminação do aquífero de Maricá mas a evidência de um problema ambiental local, continental e mundial cuja ocorrência ainda não é levada em conta nos critérios legais de qualidade da água potável. Assim, além de dar uma contribuição nova para o progresso do conhecimento científico sobre a presença e as características dos Mps em águas subterrâneas, esta pesquisa reforça a necessidade urgente de incluir esse poluente novo nas leis de controle da qualidade da água. Também é importante aumentar os investimentos em saneamento básico, principalmente em áreas rurais e periferias urbanas, onde poços rasos são usados frequentemente como fontes de água.

Além disso, os resultados mostram a urgência de ações do governo para diminuir a entrada de plásticos no meio ambiente, com destaque para o fortalecimento da coleta seletiva, o incentivo à logística reversa, a fiscalização de descartes ilegais e a promoção de atividades educativas para a população. Do ponto de vista do meio ambiente e da saúde pública, a proteção dos aquíferos deve ser vista como algo importante, considerando sua relevância para o abastecimento humano, a segurança da água frente as mudanças climáticas.

Referência

ALMEIDA, A. P, *et al.* A dinâmica complexa da migração de microplásticos por diferentes ambientes aquáticos: subsídios para um melhor entendimento de sua dispersão ambiental. *Microplásticos*, v. 2, n. 1, p. 62-77, 2023. <https://doi.org/10.3390/microplastics2010005>

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Sistemas de aquíferos. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3ec60e4f-85ea-4ba7-a90c-734b57594f90>. Acesso em: jan. 2023.

ANDRADY, A. L. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, v. 62, n. 8, p. 1596–1605, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>.

ANDRADY, A. L. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, v. 62, n. 8, p. 1596–1605, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (ABAS). Poços para captação de água. Disponível em: <https://www.abas.org/educacao/pocos-para-captacao-de-agua/>. Acesso em: abr. 2023.

BERTOLDI, Crislaine Fabiana. *Distribuição espaçotemporal, abundância e caracterização de microplásticos em águas superficiais do Lago Guaíba*. 2022. 166 f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022

BHAGAT, J. *et al.* A review on identification, quantification and possible risk evaluation of microplastics. *Environmental Pollution*, v. 280, n. 116947, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116947>.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de resolução de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 7 abr. 2008. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2013/11/res39608.pdf>. Acesso em: abr. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 7 abr. 2008. Disponível em:

https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2008/res_conam_a_396_2008_classificacao_enquadramento_aguas_subterraneas.pdf. Acesso em: abr. 2024.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: abr. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União* : seção 1, Brasília, DF, 14 dez. 2011.

CAMPOY, Pedro; BEIRAS, Ricardo. Revisão: Efeitos ecológicos de macro, meso e microplásticos. *Monitoramento e Avaliação Ambiental*, v. 11, pág. 581, 2019.

CARPINTEIRO, EJ; SMITH, KL Plásticos na superfície do Mar dos Sargaços. *Ciência* , v. 175, n. 4027, pág. 1240–1241, 1972. DOI: 10.1126/science.175.4027.1240.

CARVALHO DA SILVA, André Luiz, et al. Caracterização geomorfológica e sedimentar da planície costeira de Maricá (Rio de Janeiro). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 2, p. 217–230, 2014. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i2.470>

CHIA, Rogers Wainkwa et al. Poluição por microplásticos no solo e nas águas subterrâneas: uma revisão. *Environmental Chemistry Letters*, v. 19, n. 6, p. 4211-4224, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01297-6>

COLE, M. et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bulletin*, v. 62, n. 12, p. 2588–2597, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>.

CORSI, Ilaria et al. Nanoplásticos em águas urbanas: avanços recentes na base de conhecimento. *Microplásticos na gestão de águas urbanas*, p. 407-444, 2022. <https://doi.org/10.1002/9781119759379.ch13>

CRIADO, M.Á. Os microplásticos chegaram ao intestino humano. *El País*, v. 29, 2018. Disponível em: https://brasil.elpais.com/brasil/2018/10/22/ciencia/1540213637_935289.html. Acesso em 22 de maio de 2025.

- CRUZ, A.; JR, GC da S.; ALMEIDA, G. de M.** Modelagem hidrogeoquímica do aquífero freático da restinga de Piratininga, Niterói-RJ. *Águas Subterrâneas*, 2006. <https://aguassubterraneas.emnuvens.com.br/asubterraneas/article/view/23057>
- CRUZ, CBM et al.** Impactos ambientais no sistema lagunar de Maricá-Guarapina. 1996.
- DA SILVA MELLO, Marco Antonio.** Gente das areias: história, meio ambiente e sociedade no litoral brasileiro, Maricá, RJ, 1975 a 1995. EdUFF, 2004.
- DOS SANTOS, Cátia Pereira et al.** Evolução paleoambiental durante o Holoceno da planície costeira de Maricá, Rio de Janeiro, Brasil, através de biomineralizações de sílica. *Revista Sul-Americana de Ciências da Terra*, v. 121, p. 104098, 2023. DOI: <https://doi.org/10.12957/tamoios.2017.26120>
- EERKES-MEDRANO, D.; LESLIE, HA; QUINN, B.** Microplásticos em água potável: uma revisão e avaliação. *Opinião Atual em Ciência Ambiental e Saúde*, v. 7, p. 69-75, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.12.001>
- ERIKSEN, Marcus et al.** Poluição por microplásticos nas águas superficiais dos Grandes Lagos Laurentianos. *Marine pollution bulletin*, v. 77, n. 1-2, p. 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>
- ESFANDIARI, Atefeh et al.** Distribuição e transporte de microplásticos em águas subterrâneas (aquífero Shiraz, sudoeste do Irã). *Water Research*, v. 220, p. 118622, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118622>
- FILHO, José Teixeira de Seixas; SILVA, Carlos Alberto Figueiredo da.** *I Seminário das Águas – Lagoas do Rio*. Rio de Janeiro, jun. 2016. 152 pág.
- FEITOSA, FAC et al.** *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. CPRM, 2008.
- FILHO, José Teixeira de Seixas; SILVA, Carlos Alberto Figueiredo da.** *I Seminário das Águas – Lagoas do Rio*. Rio de Janeiro, jun. 2016. 152 pág.
- FRIAS, J. P. G. L.; NASH, R.** Microplastics: finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, v. 138, p. 145–147, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>.

KARBALAEI, Samaneh et al. Ocorrência, fontes, impactos na saúde humana e mitigação da poluição por microplásticos. *Ciência ambiental e pesquisa sobre poluição*, v. 25, p. 36046-36063, 2018.

GESAMP (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. London: IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, 2015. (GESAMP Reports and Studies, n. 90). Disponível em: <https://www.gesamp.org/publications/microplastics-in-the-marine-environment>. Acesso em: 12 maio 2025.

GLEESON, T. et al. Balanço hídrico de aquíferos globais revelado pela pegada de água subterrânea. *Natureza*, v. 488, n. 7410, pág. 197-200, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature11295>

GOEPPERT, Nadine; GOLDSCHIEDER, Nico. Melhor compreensão do transporte de partículas em águas subterrâneas cársticas usando sedimentos naturais como traçadores. *Water Research*, v. 166, p. 115045, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115045>

GUERRINI, Federica et al. Modelagem da exportação de carbono mediada por microplásticos bioincrustados no Mar Mediterrâneo. *Limnologia e Oceanografia*, v. 68, n. 5, pág. 1078-1090, 2023. <https://doi.org/10.1002/lno.12330>

GUNAALAN, Kuddithamby et al. Abundância e distribuição de microplásticos em águas superficiais do Kattegat/Skagerrak (Dinamarca). *Environmental Pollution*, v. 318, p. 120853, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120853>

HIDALGO-RUZ, V. et al. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, v. 46, n. 6, p. 3060–3075, 2012. <https://doi.org/10.1021/es2031505>.

HOLZER, SANTOS, Notas sobre a dispersão urbana: o exemplo de Maricá, RJ. *Produção e Gestão do Espaço. Niterói, FAPERJ/Casa*, v. 8, p. 279-294, 2014.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010: características da população e dos domicílios. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. Disponível

em:https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/93/cd_2010_caracteristicas_populacao_domicilios.pdf. Acesso em: 19 maio 2025

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama – Maricá. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/marica.html>. Acesso em: abr. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – Maricá-RJ. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/marica/pesquisa/30/84366> . Acesso em: abr. 2023.

IMHOF, H. K. et al. Spatial and temporal variation of macro-, meso- and microplastic abundance on a remote coral island of the Maldives, Indian Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, v. 116, n. 1-2, p. 340–347, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.010>.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Dados históricos anuais*. Brasília: INMET, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 14 maio 2025.

JEONG, E.; LEE, J.-Y.; REDWAN, M. Exposição animal a microplásticos e efeitos na saúde: Uma revisão. *Emerging Contaminants*, v. 10, n. 4, p. 100369, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100369>

KOELMANS, A. A. et al. Avaliação de risco de partículas microplásticas. *Nature Reviews Materials*, v. 7, n. 2, p. 138-152, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00411-y>

KONIKOW, L. F.; KENDY, E. Depleção de águas subterrâneas: um problema global. *Hydrogeology Journal*, v. 13, n. 1, p. 317-320, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0411-8>

KUMAR, R. et al. Efeitos acoplados de microplásticos e metais pesados em plantas: perspectivas de absorção, bioacumulação e saúde ambiental. *Science of the Total Environment*, v. 836, p. 155619, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155619>

LAPWORTH, D. J. et al. Urban groundwater quality in sub-Saharan Africa: current status and implications for water security and public health. *Hydrogeology journal*, v. 25, n. 4, p. 1093, 2017. doi: [10.1007/s10040-016-1516-6](https://doi.org/10.1007/s10040-016-1516-6)

LESLIE, H. A. *et al.* Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, v. 163, p. 107199, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>

POMPÊO, Marcelo; RANI-BORGES, Bárbara; PAIVA, Teresa Cristina. Brazil de. Microplásticos nos ecossistemas: impactos e soluções. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2021. Cap. 6. p. 61–72

MACE, Robert E. The importance of groundwater sustainability. In: *Groundwater Sustainability: Conception, Development, and Application*. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 1-20. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-13516-3_1

MANZIONE, Rodrigo Lilla. *Águas Subterrâneas: Conceitos e Aplicações sob uma Visão Multidisciplinar*. Jundiaí: Paco Editorial, 2015. ISBN 978-85-8148-786-1 https://doi.org/10.1007/978-3-031-13516-3_1

MCCORMICK, A. R. *et al.* Microplástico em águas superficiais de rios urbanos: concentração, fontes e associações bacterianas associadas. *Ecosfera*, v. 7, n. 11, p. e01556, 2016. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1556>

NGUELEU, Stéphane K.; GRATHWOHL, Peter; CIRPKA, Olaf A. Effect of natural particles on the transport of lindane in saturated porous media: Laboratory experiments and model-based analysis. *Journal of contaminant hydrology*, v. 149, p. 13-26, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.02.009>

OLIVATTO, G. P. *et al.* Microplastic contamination in surface waters in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, v. 139, p. 157-162, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.042>

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). *Diretrizes para qualidade da água potável*. 2022.

OYUNJI, Michele Abuche. Urbanização e ambiente: análise urbano-ambiental do processo de expansão urbana de Maricá-RJ e seus impactos socioambientais. *OLAM – Ciência & Tecnologia*, v. 13, n. 1, p. 56–77, 2013. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/olam/article/view/7508>.

Acesso em: 22 maio 2025.

PANNO, S. V. et al. Microplastic contamination in karst groundwater systems. *Groundwater*, v. 57, n. 2, p. 189-196, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/gwat.12862>

PARKER, L. Microplásticos estão em nossos corpos. O quanto eles nos prejudicam? *National Geographic*. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/microplastics-are-in-our-bodies-how-much-do-they-harm-us>. Acesso em: 30 maio 2024.

PRATA, J. C. Airborne microplastics: consequences to human health?. *Environmental Pollution*, v. 234, p. 115-126, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.043>

Prefeitura Municipal de Maricá. Lei nº 2272, de 14 de novembro de 2008: Estabelece as condições de uso, ocupação e parcelamento do solo para o Município de Maricá. Disponível em: https://www.marica.rj.gov.br/wp-content/uploads/2022/10/LEI_No_2272_DE_14_DE_NOVEMBRO_DE_2008-_ESTABELECE_AS_CONDICICOES_DE_USO_OCUPACAO_E_PARCELAMENTO_DO_SOLO_PARA_O_MUNICIPIO_DE_MARICA.pdf. Acesso em: 22 maio 2025.

RAGUSA, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, v. 146, p. 106274, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

RITCHIE, H.; ROSER, M. Plastic pollution. *Our World in Data*. 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>. Acesso em: 4 set. 2023.

ROCHMAN, C. M. et al. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports*, v. 3, n. 3263, 2013. <https://doi.org/10.1038/srep03263>.

ROCHMAN, C. M. et al. Repensando os microplásticos como um conjunto diversificado de contaminantes. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 38, n. 4, p. 703–711, 2019. DOI: 10.1002/etc.4371.

SANTOS, Cátia Pereira dos et al. Caracterização das comunidades vegetais na restinga de Maricá, Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil. *Revista Tamoios*, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 121–135, jan./jun. 2017. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/tamoios/article/view/26120>. Acesso em: 22 maio 2025.

SANTOS, Cátia Pereira dos et al. Caracterização das comunidades vegetais na restinga de Maricá, Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil. *Revista Tamoios*, v. 13, n. 1, p.

121–135, 2017. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/tamoios/article/view/26120>. Acesso em: 22 maio 2025.

SCANLON, Bridget R. et al. Recursos hídricos globais e o papel das águas subterrâneas em um futuro resiliente. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 4, n. 2, p. 87-101, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00378-6>

SHAMSUDDUHA, Mohammad et al. The impact of intensive groundwater abstraction on recharge to a shallow regional aquifer system: evidence from Bangladesh. *Hydrogeology Journal*, v. 19, n. 4, p. 901, 2011. DOI:10.1007/s10040-011-0723-4

SILVA, A. L. C. et al. Sedimentary architecture and depositional evolution of the Quaternary coastal plain of Maricá, Rio de Janeiro, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 2, p. 191-206, 2014. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400020002>

SILVA, Janie Garcia da; OLIVEIRA, Arline Souza de. A vegetação de restinga no Município de Maricá - RJ. *Acta Botanica Brasilica*, v. 4, n. 2, p. 149–161, 1990. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abb/a/svVPTQdMkfjy8gGL5BQB3Cw/>. Acesso em: 22 maio 2025.

SILVA, S. P.; AMARAL PEREIRA, C. Bancos comunitários, moedas sociais e políticas públicas: da experiência pioneira do banco Palmas (Fortaleza-CE) ao modelo difusor do banco Mumbuca (Maricá-RJ). *Texto para Discussão*, 2023. [doi:10.38116/td2843hdl:10419/284899](https://doi.org/10.38116/td2843hdl:10419/284899)

SILVEIRA, P. H. M. Aspectos hidrogeoquímicos e de qualidade da água do aquífero costeiro de Itaipuaçu, Maricá – RJ. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. <http://hdl.handle.net/11422/5400>

SILVESTRE, C. P. et al. Geomorfologia, sedimentação e processos atuantes na Lagoa de Maricá, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18, n. 2, p. 237–256, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i2.1111>

SOCHACZEWSKI, Jeronymo. *Contexto do desenvolvimento adotado pelo município de Maricá, RJ*. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro,

2016. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/26204>. Acesso em: 19 maio 2025.

SULISTYOWATI, Lilik et al. The occurrence and abundance of microplastics in surface water of the midstream and downstream of the Cisadane River, Indonesia. *Chemosphere*, v. 291, p. 133071, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133071>

TAYLOR, R. G. et al. Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 4, p. 322-329, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>

SHOCKLEY, D. J.; LAPWORTH, D. J. Microplastics in groundwater: a literature review. 2022. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/532669/>

VIAROLI, Stefano; LANCIA, Michele; RE, Viviana. Microplastics contamination of groundwater: Current evidence and future perspectives. A review. *Science of the Total Environment*, p. 153851, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153851>

VIEIRA DANTAS FILHO, J. et al. Primeira evidência de microplásticos em água doce de fazendas de peixes no estado de Rondônia, Brasil. *Heliyon*, v. 4, e15066, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15066>.

WANG, Wenfeng et al. Poluição por microplásticos em águas doces interiores da China: Um estudo de caso em águas superficiais urbanas de Wuhan, China. *Ciência do Meio Ambiente Total*, v. 575, p. 1369-1374, 2017.

WANG, Ziheng; SEDIGHI, Majid; LEA-LANGTON, Amanda. Filtração de esferas microplásticas por biochar: eficiência de remoção e mecanismos de imobilização. *Water Research*, v. 184, p. 116165, 2020. DOI:10.1016/j.watres.2020.116165

WERNER, A. D. et al. Processos de intrusão de água do mar, investigação e gestão: Avanços recentes e desafios futuros. *Advances in Water Resources*, v. 51, p. 3-26, 2013. DOI:10.1016/j.advwatres.2012.03.004

WRIGHT, S. L.; THOMPSON, R. C.; GALLOWAY, T. S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. *Environmental Pollution*, v. 178, p. 483–492, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>.

ZHANG, T. et al. Status atual da poluição por microplásticos no ambiente aquático, interação com outros poluentes e efeitos em organismos aquáticos. *Environmental*

Science and Pollution Research, v. 29, n. 12, p. 16830-16859, 2022.
DOI:10.1007/s11356-022-18504-8

ZOLOTOVA, N. *et al.* Efeitos nocivos da poluição por microplásticos na saúde animal: uma revisão da literatura. *PeerJ*, v. 10, p. e13503, 2022. DOI: 10.7717/peerj.13503.

9 Anexo I – Tabela com os 127 artigos filtrados da pesquisa avançada do Scopus

Autores	Ano	Título	Revista
A T, R., Banerjee, A., Mitra, A., Nethaji, K., Ilanchoorian, D., & Radhakrishnan, A. K.	2024	A concise review of the impact of groundwater pollution in coastal regions on human gut microbiome composition and its effect on human health	Groundwater for Sustainable Development
Aguilar-Aguilar, A., de León-Martínez, L. D., Forgiionny, A., Acelas Soto, N. Y., Mendoza, S. R., & Zárate-Guzmán, A. I.	2023	A systematic review on the current situation of emerging pollutants in Mexico: A perspective on policies, regulation, detection, and elimination in water and wastewater	Science of The Total Environment
Alfonso, M. B., Arias, A. H., Ronda, A. C., & Piccolo, M. C.	2021	Continental microplastics: Presence, features, and environmental transport pathways	Science of The Total Environment
Alimi, O. S., Farner, J. M., & Tufenkji, N.	2021	Exposure of nanoplastics to freeze-thaw leads to aggregation and reduced transport in model groundwater environments	Water Research
Balestra, V., Vigna, B., de Costanzo, S., & Bellopede, R.	2023	Preliminary investigations of microplastic pollution in karst systems, from surface watercourses to cave waters	Journal of Contaminant Hydrology
Baraza, T., & Hasenmueller, E. A.	2023	Floods enhance the abundance and diversity of anthropogenic microparticles (including microplastics and treated cellulose) transported through karst systems	Water Research
Bäuerlein, P. S., Hofman-Caris, R. C. H. M., Pieke, E. N., & ter Laak, T. L.	2022	Fate of microplastics in the drinking water production	Water Research
Brožová, K., Halfar, J., Čabanová, K., Motyka, O., Drabinová, S., Hanus, P., & Heviánková, S.	2023	The first evidence of microplastic occurrence in mine water: The largest black coal mining area in the Czech Republic	Water Research
Cha, J., Lee, J.-Y., & Chia, R. W.	2023	Microplastics contamination and characteristics of agricultural groundwater in Haeon Basin of Korea	Science of The Total Environment

Cha, J., Lee, J.-Y., & Lee, J.	2024	Effects of groundwater sample volume on identified microplastics in groundwater of an agricultural area in Korea	Science of The Total Environment
Chamane, G., Sewwandi, M., Wijesekara, H., & Vithanage, M.	2024	Occurrence and abundance of microplastics and plasticizers in landfill leachate from open dumpsites in Sri Lanka	Environmental Pollution
Chen, G., Zou, Y., Xiong, G., Wang, Y., Zhao, W., Xu, X., Zhu, X., Wu, J., Song, F., & Yu, H.	2024	Microplastic transport and ecological risk in coastal intruded aquifers based on a coupled seawater intrusion and microplastic risk assessment model	Journal of Hazardous Materials
Chen, X., Wan, Y., Jia, J., Qiang, X., & Wu, C.	2023	Transport of micron-sized polyethylene particles in confined aquifer: Effects of size, aging, and confining pressure	Heliyon
Chen, Y., Mo, C., Wu, M., Hao, Y., Cheng, Z., Lu, G., Li, Q., Hu, B. X., Wu, J., & Wu, J.	2023	Important effects of polypropylene on migration of ciprofloxacin in groundwater	Journal of Environmental Chemical Engineering
Chia, R. W., Lee, J.-Y., Jang, J., & Cha, J.	2022	Errors and recommended practices that should be identified to reduce suspected concentrations of microplastics in soil and groundwater: A review	Environmental Technology & Innovation
Chinglenthoba, C., Pukhrambam, B., Chanu, K. T., Devi, K. S., Meitei, N. J., Devika, Y., & Valiyaveetil, S.	2023	A review on microplastic pollution research in India	Regional Studies in Marine Science
Dey, U., Raj, D., Mondal, M., Roy, P., Mukherjee, A., Mondal, N. K., & Das, K.	2023	Microplastics in groundwater: An overview of source, distribution, mobility constraints and potential health impacts during the anthropocene	Groundwater for Sustainable Development
Ding, Y., Wang, J., Zhang, Y., Zhang, Y., Xu, W., Zhang, X., Wang, Y., & Li, D.	2023	Response characteristics of indigenous microbial community in polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated aquifers under polyethylene microplastics stress: A microcosmic experimental study	Science of The Total Environment
Dong, S., Suakollie, E. B., Cao, S., Su, X., Fan, W., Yu, Y., & Xia, J.	2024	Effect of NaNO ₃ , NH ₄ Cl and urea on the fate and transformation of various typical microplastics in porous media	Environmental Pollution

Dong, Y., Gao, M., Qiu, W., & Song, Z.	2021	Uptake of microplastics by carrots in presence of As (III): Combined toxic effects	Journal of Hazardous Materials
Eerkes-Medrano, D., Leslie, H. A., & Quinn, B.	2019	Microplastics in drinking water: A review and assessment	Current Opinion in Environmental Science & Health
Esfandiari, A., Abbasi, S., Peely, A. B., Mowla, D., Ghanbarian, M. A., Oleszczuk, P., & Turner, A.	2022	Distribution and transport of microplastics in groundwater (Shiraz aquifer, southwest Iran)	Water Research
Fei, J., Bai, X., Jiang, C., Yin, X., & Ni, B.-J.	2024	A state-of-the-art review of environmental behavior and potential risks of biodegradable microplastics in soil ecosystems: Comparison with conventional microplastics	Science of The Total Environment
Gan, Q., Cui, J., & Jin, B.	2023	Environmental microplastics: Classification, sources, fates, and effects on plants	Chemosphere
Gao, D., Li, X., & Liu, H.	2020	Source, occurrence, migration and potential environmental risk of microplastics in sewage sludge and during sludge amendment to soil	Science of The Total Environment
Gao, J., Pan, S., Li, P., Wang, L., Hou, R., Wu, W.-M., Luo, J., & Hou, D.	2021	Vertical migration of microplastics in porous media: Multiple controlling factors under wet-dry cycling	Journal of Hazardous Materials
Gao, W., Wang, X., Diao, Y., Gong, Y., Miao, J., Sang, W., Yuan, H., Shen, Z., El-sayed, M. E. A., & Abdelhafeez, I. A.	2024	Co-impacts of cation type and humic acid on migration of polystyrene microplastics in saturated porous media	Journal of Environmental Management
Geissen, V., Mol, H., Klumpp, E., Umlauf, G., Nadal, M., van der Ploeg, M., van de Zee, S. E. A. T. M., & Ritsema, C. J.	2015	Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management	International Soil and Water Conservation Research
Goeppert, N., & Goldscheider, N.	2019	Experimental field evidence for transport of microplastic tracers over large distances in an alluvial aquifer	Journal of Hazardous Materials
Gong, X., Tian, L., Wang, P., Wang, Z., Zeng, L., & Hu, J.	2023	Microplastic pollution in the groundwater under a bedrock island in the South China sea	Environmental Research
Gunaratne, V., Phillips, A. J., Zanoletti, A., Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., di Maria, F.,	2024	Environmental pitfalls and associated human health risks and ecological impacts from landfill leachate contaminants: Current evidence, recommended interventions and future directions	Science of The Total Environment

Pivato, A., Korzeniewska, E., & Bontempi, E.			
Gündoğdu, S., Mihai, F.-C., Fischer, E. K., Blettler, M. C. M., Turgay, O. C., Akça, M. O., Aydoğan, B., & Ayat, B.	2023	Micro and nano plastics in groundwater systems: A review of current knowledge and future perspectives	TrAC Trends in Analytical Chemistry
Guo, J., Rong, H., He, L., Chen, C., Zhang, B., & Tong, M.	2024	Effects of arsenic on the transport and attachment of microplastics in porous media	Journal of Hazardous Materials
Hajji, S., Ben-Haddad, M., Rida Abelouah, M., De-la-Torre, G. E., & Ait Alla, A.	2023	Sludge drying and dewatering processes influence the abundance and characteristics of microplastics in wastewater treatment plants	Chemosphere
He, H., Wu, T., Chen, Y.-F., & Yang, Z.	2023	A pore-scale investigation of microplastics migration and deposition during unsaturated flow in porous media	Science of The Total Environment
Heerey, L., O’Sullivan, J. J., Bruen, M., Turner, J., Mahon, A. M., Murphy, S., Lally, H. T., O’Connor, J. D., O’Connor, I., & Nash, R.	2023	Export pathways of biosolid derived microplastics in soil systems – Findings from a temperate maritime climate	Science of The Total Environment
Huang, J., Chen, H., Zheng, Y., Yang, Y., Zhang, Y., & Gao, B.	2021	Microplastic pollution in soils and groundwater: Characteristics, analytical methods and impacts	Chemical Engineering Journal
Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., van der Ploeg, M., Besseling, E., Koelmans, A. A., & Geissen, V.	2017	Incorporation of microplastics from litter into burrows of <i>Lumbricus terrestris</i>	Environmental Pollution
Hurley, R. R., & Nizzetto, L.	2018	Fate and occurrence of micro(nano)plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks	Current Opinion in Environmental Science & Health
Iannuzzi, Z., Mourier, B., Winiarski, T., Lipeme-Kouyi, G., Polomé, P., & Bayard, R.	2024	Contribution of different land use catchments on the microplastic pollution in detention basin sediments	Environmental Pollution
Ioannidis, I., Kinigopoulou, V., Giannakoudakis, D. A., Arkas, M., Anastopoulos, I., Triantafyllidis, K. S., & Pashalidis, I.	2023	Microplastics and disposable face masks as “Trojan Horse” for radionuclides pollution in water bodies – A review with emphasis on the involved interactions	Sustainable Chemistry for the Environment

Ivanic, F. M., Guggenberger, G., Woche, S. K., Bachmann, J., Hoppe, M., & Carstens, J. F.	2023	Soil organic matter facilitates the transport of microplastic by reducing surface hydrophobicity	Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects
Jeong, E., Kim, Y.-I., Lee, J.-Y., & Raza, M.	2023	Microplastic contamination in groundwater of rural area, eastern part of Korea	Science of The Total Environment
Johnson, W. P., Rasmuson, A., Ron, C., Erickson, B., VanNess, K., Bolster, D., & Peters, B.	2020	Anionic nanoparticle and microplastic non-exponential distributions from source scale with grain size in environmental granular media	Water Research
K, M. B., Natesan, U., R, V., R, P. K., R, R., & S, S.	2021	Spatial distribution of microplastic concentration around landfill sites and its potential risk on groundwater	Chemosphere
Keesari, T.	2024	Tracing the footprints of contaminants in water environment through the application of stable isotopic systematics	Current Opinion in Environmental Science & Health
Kim, Y.-I., Jeong, E., Lee, J.-Y., Chia, R. W., & Raza, M.	2023	Microplastic contamination in groundwater on a volcanic Jeju Island of Korea	Environmental Research
King, C. D., Stephens, C. G., Lynch, J. P., & Jordan, S. N.	2023	Farmers' attitudes towards agricultural plastics – Management and disposal, awareness and perceptions of the environmental impacts	Science of The Total Environment
Koelmans, A. A., Mohamed Nor, N. H., Hermsen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & de France, J.	2019	Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality	Water Research
Korzeniowska, J., & Mikulski, A.	2024	The effect of bed load sediments on self-purification of river – Experimental approach	Ecohydrology & Hydrobiology
Koutnik, V. S., Leonard, J., Brar, J., Cao, S., Glasman, J. B., Cowger, W., Ravi, S., & Mohanty, S. K.	2022	Transport of microplastics in stormwater treatment systems under freeze-thaw cycles: Critical role of plastic density	Water Research
Kumar, R., Sharma, P., & Bandyopadhyay, S.	2021	Evidence of microplastics in wetlands: Extraction and quantification in Freshwater and coastal ecosystems	Journal of Water Process Engineering

la Cecilia, D., Philipp, M., Kaegi, R., Schirmer, M., & Moeck, C.	2024	Microplastics attenuation from surface water to drinking water: Impact of treatment and managed aquifer recharge – and identification uncertainties	Science of The Total Environment
Laramie, A. R., Shuster, W. D., Wager, Y. Z., & Darabi, M.	2024	Field assessment of engineered bioretention as microplastics sink through site characterization and hydrologic modeling	Journal of Hazardous Materials
Lee, Y. K., Yoo, H.-Y., Ko, K.-S., He, W., Karanfil, T., & Hur, J.	2022	Tracing microplastic (MP)-derived dissolved organic matter in the infiltration of MP-contaminated sand system and its disinfection byproducts formation	Water Research
Li, F., Huang, D., Wang, G., Cheng, M., Chen, H., Zhou, W., Xiao, R., Li, R., Du, L., & Xu, W.	2024	Microplastics/nanoplastics in porous media: Key factors controlling their transport and retention behaviors	Science of The Total Environment
Li, M., Wang, Z., Zhu, L., Zhu, Y., Yi, J., & Fu, X.	2024	Research advances on microplastics contamination in terrestrial geoenvironment: A review	Science of The Total Environment
Li, S., Yang, M., Wang, H., & Jiang, Y.	2023	Cotransport of microplastics and sulfanilamide antibiotics in groundwater: The impact of MP/SA ratio and aquifer media	Environmental Research
Li, W., Brunetti, G., Zafiu, C., Kunaschk, M., Debreczeby, M., & Stumpp, C.	2024	Experimental and simulated microplastics transport in saturated natural sediments: Impact of grain size and particle size	Journal of Hazardous Materials
Li, Y., Deng, Y., Hu, C., Li, D., Zhang, J., & Zhou, N.	2024	Microplastic pollution in urban rivers within China's Danxia landforms: Spatial distribution characteristics, migration, and risk assessment	Science of The Total Environment
Liang, Y., Liu, X., Zhai, W., Guo, Q., Guo, H., Lv, S., Wang, Z., Zhao, F., Zheng, L., Zhou, Z., Liu, D., & Wang, P.	2024	Agricultural film-derived microplastics elevate the potential risk of pesticides in soil ecosystem: The inhibited leaching by altering soil pore	Journal of Hazardous Materials
Liu, Y., Wu, L., Shi, G., Cao, S., & Li, Y.	2022	Characteristics and sources of microplastic pollution in the water and sediments of the Jinjiang River Basin, Fujian Province, China	China Geology
Liu, Z., Bacha, A.-U.-R., & Yang, L.	2023	Control strategies for microplastic pollution in groundwater	Environmental Pollution
Lofty, J., Muhawenimana, V., Wilson, C. A. M. E., & Ouro, P.	2022	Microplastics removal from a primary settler tank in a wastewater treatment plant and estimations of contamination onto European agricultural land via sewage sludge recycling	Environmental Pollution
Lou, F., Wang, J., Sima, J., Lei, J., & Huang, Q.	2023	Mass concentration and distribution characteristics of microplastics in landfill mineralized	Journal of Hazardous

		refuse using efficient quantitative detection based on Py-GC/MS	Materials
Luo, Z., Zhu, J., Yu, L., & Yin, K.	2021	Heavy metal remediation by nano zero-valent iron in the presence of microplastics in groundwater: Inhibition and induced promotion on aging effects	Environmental Pollution
Mahapatra, S., Maity, J. P., Singha, S., Mishra, T., Dey, G., Chandra Samal, A., Banerjee, P., Biswas, C., Chattopadhyay, S., Patra, R. R., Patnaik, S., & Bhattacharya, P.	2024	Microplastics and nanoplastics in environment: Sampling, characterization and analytical methods	Groundwater for Sustainable Development
Matjašič, T., Simčič, T., Kanduč, T., Samardžija, Z., & Mori, N.	2021	Presence of polyethylene terephthalate (PET) fibers in hyporheic zone alters colonization patterns and seasonal dynamics of biofilm metabolic functioning	Water Research
Mesquita, D. P., Quintelas, C., & Ferreira, E. C.	2023	Fate and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants	Environmental Science Advances
Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M. S., Gloria-García, L., Cervantes-Avilés, P., & Mahlkecht, J.	2021	A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla	Science of The Total Environment
Mora, A., Torres-Martínez, J. A., Capparelli, M. v, Zabala, A., & Mahlkecht, J.	2022	Effects of wastewater irrigation on groundwater quality: An overview	Current Opinion in Environmental Science & Health
Mortula, M. M., Atabay, S., Fattah, K. P., & Madbuly, A.	2021	Leachability of microplastic from different plastic materials	Journal of Environmental Management
Mu, H., Wang, Y., Zhang, H., Guo, F., Li, A., Zhang, S., Liu, S., & Liu, T.	2022	High abundance of microplastics in groundwater in Jiaodong Peninsula, China	Science of The Total Environment
Niu, L., Li, Y., Li, Y., Hu, Q., Wang, C., Hu, J., Zhang, W., Wang, L., Zhang, C., & Zhang, H.	2021	New insights into the vertical distribution and microbial degradation of microplastics in urban river sediments	Water Research
O'Connor, D., Pan, S., Shen, Z., Song, Y., Jin, Y., Wu, W.-M., & Hou, D.	2019	Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles	Environmental Pollution

Oladoja, N. A., & Unuabonah, I. E.	2021	The pathways of microplastics contamination in raw and drinking water	Journal of Water Process Engineering
Ouda, M., Kadadou, D., Swaidan, B., Al-Othman, A., Al-Asheh, S., Banat, F., & Hasan, S. W.	2021	Emerging contaminants in the water bodies of the Middle East and North Africa (MENA): A critical review	Science of The Total Environment
Park, S., Kim, I., Jeon, W.-H., & Moon, H. S.	2023	Exploring the vertical transport of microplastics in subsurface environments: Lab-scale experiments and field evidence	Journal of Contaminant Hydrology
Pavithra, K., Vairaperumal, T., KS, V., Mukhopadhyay, M., Malar, P., & Chakraborty, P.	2024	Microplastics in packaged water, community stored water, groundwater, and surface water in rivers of Tamil Nadu after the COVID-19 pandemic outbreak	Journal of Environmental Management
Priya, K. L., Iqbal, S., Archana, A. R., Gopika, B., Mina, M., Haddout, S., & M Madhu, A.	2023	Implications of solid waste dumps on the microplastic abundance in groundwater in Kollam, India	Journal of Environmental Management
Purushothaman, A., Vishnudattan, N. K., Nehala, S. P., Meghamol, M. D., Neethu, K. v, Joseph, J., Nandan, S. B., Padmakumar, K. B., & Thomas, L. C.	2023	Patterns and variability in the microplastic contamination along the southwest coast of India with emphasis on submarine groundwater discharge sites	Marine Pollution Bulletin
Qi, R., Jones, D. L., Li, Z., Liu, Q., & Yan, C.	2020	Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review	Science of The Total Environment
Qi, S., Song, J., Shentu, J., Chen, Q., & Lin, K.	2022	Attachment and detachment of large microplastics in saturated porous media and its influencing factors	Chemosphere
Qiu, Y., Zhou, S., Zhang, C., Chen, L., Qin, W., & Zhang, Q.	2023	Vertical distribution and weathering characteristic of microplastics in soil profile of different land use types	Science of The Total Environment
Rahman, M. A., Haque, M. M., & Tareq, S. M.	2024	Abundance and characteristics of microplastics in the landfill leachate of Amin Bazar, Dhaka: A potential risk to aquatic environments	Physics and Chemistry of the Earth
Ranjan, V. P., Joseph, A., Sharma, H. B., & Goel, S.	2023	Preliminary investigation on effects of size, polymer type, and surface behaviour on the vertical mobility of microplastics in a porous media	Science of The Total Environment

Ren, Z., Gui, X., Wei, Y., Chen, X., Xu, X., Zhao, L., Qiu, H., & Cao, X.	2021	Chemical and photo-initiated aging enhances transport risk of microplastics in saturated soils: Key factors, mechanisms, and modeling	Water Research
Ren, Z., Gui, X., Xu, X., Zhao, L., Qiu, H., & Cao, X.	2021	Microplastics in the soil-groundwater environment: Aging, migration, and co-transport of contaminants – A critical review	Journal of Hazardous Materials
Rodríguez-Alcántara, J. S., Contreras-Llin, A., Cruz-Pérez, N., García-Gil, A., Baquedano, C., Marazuela, M. Á., Díaz-Cruz, M. S., León, J. M., & Santamarta, J. C.	2024	Presence of microplastics in the groundwater of volcanic islands, El Hierro and La Palma (Canary Islands)	Journal of Contaminant Hydrology
Samandra, S., Johnston, J. M., Jaeger, J. E., Symons, B., Xie, S., Currell, M., Ellis, A. v, & Clarke, B. O.	2022	Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia	Science of The Total Environment
Sangkham, S., Aminul Islam, Md., Adhikari, S., Kumar, R., Sharma, P., Sakunkoo, P., Bhattacharya, P., & Tiwari, A.	2023	Evidence of microplastics in groundwater: A growing risk for human health	Groundwater for Sustainable Development
Selvam, S., Jesuraja, K., Venkatramanan, S., Roy, P. D., & Jeyanthi Kumari, V.	2021	Hazardous microplastic characteristics and its role as a vector of heavy metal in groundwater and surface water of coastal south India	Journal of Hazardous Materials
Sharma, P., Sharma, P., & Abhishek, K.	2024	Sampling, separation, and characterization methodology for quantification of microplastic from the environment	Journal of Hazardous Materials Advances
Shehu, Z., Nyakairu, G. W. A., Tebandeke, E., & Odume, O. N.	2022	Overview of African water resources contamination by contaminants of emerging concern	Science of The Total Environment
Shu, X., Xu, L., Yang, M., Qin, Z., Zhang, Q., & Zhang, L.	2023	Spatial distribution characteristics and migration of microplastics in surface water, groundwater and sediment in karst areas: The case of Yulong River in Guilin, Southwest China	Science of The Total Environment
Singh, S., & Bhagwat, A.	2022	Microplastics: A potential threat to groundwater resources	Groundwater for Sustainable Development
Singh, S., Chakma, S., Alawa, B., Kalyanasundaram, M., & Diwan, V.	2023	Identification, characterization, and implications of microplastics in soil – A case study of Bhopal, central India	Journal of Hazardous Materials Advances

Singh, S., Malyan, S. K., Maithani, C., Kashyap, S., Tyagi, V. K., Singh, R., Malhotra, S., Sharma, M., Kumar, A., Panday, B. K., & Pandey, R. P.	2023	Microplastics in landfill leachate: Occurrence, health concerns, and removal strategies	Journal of Environmental Management
Sun, H., Zhou, S., Jiang, Y., Qin, Z., Fei, J., Sun, Y., Wang, J., & Yin, X.	2022	Effect of cationic, anionic and non-ionic surfactants on transport of microplastics: Role of adhesion of surfactants on the polyethylene surface	Journal of Hydrology
Sun, S., Hu, X., Kang, W., & Yao, M.	2023	Combined effects of microplastics and warming enhance algal carbon and nitrogen storage	Water Research
Tumwet, F. C., Serbe, R., Kleint, T., & Scheytt, T.	2022	Effect of fragmentation on the transport of polyvinyl chloride and low-density polyethylene in saturated quartz sand	Science of The Total Environment
Umeh, O. R., Ophori, D. U., Ibo, E. M., Eke, C. I., & Oyen, T. P.	2024	Groundwater systems under siege: The silent invasion of microplastics and cock-tails worldwide	Environmental Pollution
Vázquez Juiz, M. L., Soto Gómez, D., Pérez Rodríguez, P., Paradelo, M., & López Periago, J. E.	2018	Humic acids modify the pulse size distributions in the characterization of plastic microparticles by Tunable Resistive Pulse Sensing	Journal of Contaminant Hydrology
Viaroli, S., Lancia, M., & Re, V.	2022	Microplastics contamination of groundwater: Current evidence and future perspectives	A review. Science of The Total Environment
Vieira Dantas Filho, J., Perez Pedroti, V., Temponi Santos, B. L., de Lima Pinheiro, M. M., Bezerra de Mira, Á., Carlos da Silva, F., Soares e Silva, E. C., Cavali, J., Cecília Guedes, E. A., & de Vargas Schons, S.	2023	First evidence of microplastics in freshwater from fish farms in Rondônia state, Brazil	Heliyon
Wan, Y., Chen, X., Liu, Q., Hu, H., Wu, C., & Xue, Q.	2022	Informal landfill contributes to the pollution of microplastics in the surrounding environment	Environmental Pollution
Wang, H., Zhu, J., He, Y., Wang, J., Zeng, N., & Zhan, X.	2023	Photoaging process and mechanism of four commonly commercial microplastics	Journal of Hazardous Materials
Wang, L., Wu, W.-M., Bolan, N. S., Tsang, D. C. W., Li, Y., Qin, M., & Hou, D.	2021	Environmental fate, toxicity and risk management strategies of nanoplastics in the environment: Current status and future perspectives	Journal of Hazardous Materials

Wang, N., Lai, C., Xu, F., Huang, D., Zhang, M., Zhou, X., Xu, M., Li, Y., Li, L., Liu, S., Huang, X., Nie, J., & Li, H.	2023	A review of polybrominated diphenyl ethers and novel brominated flame retardants in Chinese aquatic environment: Source, occurrence, distribution, and ecological risk assessment	Science of The Total Environment
Wang, X., Diao, Y., Dan, Y., Liu, F., Wang, H., Sang, W., & Zhang, Y.	2022	Effects of solution chemistry and humic acid on transport and deposition of aged microplastics in unsaturated porous media	Chemosphere
Wang, Y., Xie, Y., Fan, W., Yang, Z., Tan, W., Huo, M., & Huo, Y.	2022	Mechanism comparisons of transport-deposition-reentrainment between microplastics and natural mineral particles in porous media: A theoretical and experimental study	Science of The Total Environment
Wang, Z., & Sedighi, M.	2023	Dispersion properties of nanoplastic spheres in granular media at low Reynolds numbers	Journal of Contaminant Hydrology
Wei, Z., Wei, T., chen, Y., Zhou, R., Zhang, L., & Zhong, S.	2024	Seasonal dynamics and typology of microplastic pollution in Huixian karst wetland groundwater: Implications for ecosystem health	Journal of Environmental Management
Wu, B., Li, L.-W., Zu, Y.-X., Nan, J., Chen, X.-Q., Sun, K., & Li, Z.-L.	2022	Microplastics contamination in groundwater of a drinking-water source area, northern China	Environmental Research
Wu, T., Yang, Z., Hu, R., Chen, Y.-F., Zhong, H., Yang, L., & Jin, W.	2021	Film entrainment and microplastic particles retention during gas invasion in suspension-filled microchannels	Water Research
Xu, J., Zuo, R., Wu, G., Liu, J., Liu, J., Huang, C., & Wang, Z.	2024	Global distribution, drivers, and potential hazards of microplastics in groundwater: A review	Science of The Total Environment
Yahans Amuah, E. E., Boadu, J. A., & Nandomah, S.	2022	Emerging issues and approaches to protecting and sustaining surface and groundwater resources: Emphasis on Ghana	Groundwater for Sustainable Development
Yang, J., Monnot, M., Sun, Y., Asia, L., Wong-Wah-Chung, P., Doumenq, P., & Moulin, P.	2023	Microplastics in different water samples (seawater, freshwater, and wastewater): Removal efficiency of membrane treatment processes	Water Research
Yao, J., Wang, H., Ma, C., Cao, Y., Chen, W., Gu, L., He, Q., Liu, C., Xiong, J., Ma, J., Huangfu, X., & Liu, H.	2022	Cotransport of thallium(I) with polystyrene plastic particles in water-saturated porous media	Journal of Hazardous Materials

Yao, L., Hui, L., Yang, Z., Chen, X., & Xiao, A.	2020	Freshwater microplastics pollution: Detecting and visualizing emerging trends based on Citespace II	Chemosphere
Yaseen, A., Assad, I., Sofi, M. S., Hashmi, M. Z., & Bhat, S. U.	2022	A global review of microplastics in wastewater treatment plants: Understanding their occurrence, fate and impact	Environmental Research
Ye, X., Cheng, Z., Wu, M., Hao, Y., Hu, B. X., Mo, C., Li, Q., Xiang, L., Zhao, H., Wu, J., Wu, J., & Lu, G.	2022	Investigating transport kinetics of polystyrene nanoplastics in saturated porous media	Ecotoxicology and Environmental Safety
Ye, X., Cheng, Z., Wu, M., Hao, Y., Lu, G., Hu, B. X., Mo, C., Li, Q., Wu, J., & Wu, J.	2022	Effects of clay minerals on the transport of polystyrene nanoplastic in groundwater	Water Research
Zhang, Y., Li, J., Jiao, S., Li, Y., Zhou, Y., Zhang, X., Maryam, B., & Liu, X.	2024	Microfluidic sensors for the detection of emerging contaminants in water: A review	Science of The Total Environment
Zhao, Y., Chen, K., Han, F., Huang, C., He, T., Wen, H., & Shen, Z.	2024	Adsorption of oxytetracycline in hyporheic zone sediments mediated by microplastics: Experimental revelations and mechanistic insights	Journal of Cleaner Production
Zurier, H. S., & Goddard, J. M.	2021	Biodegradation of microplastics in food and agriculture	Current Opinion in Food Science