

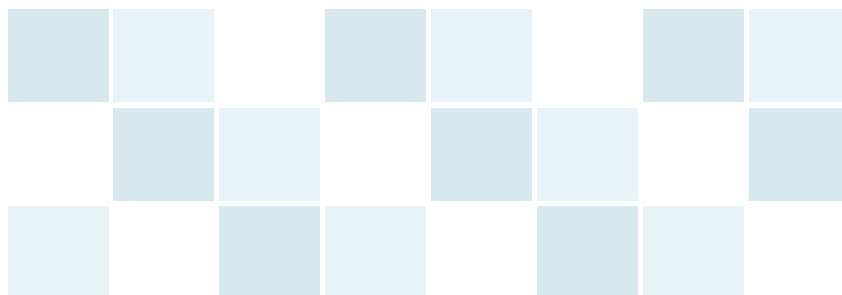
IWPPO

Proceedings of the 2nd International Workshop on Plastic Pollution in the Oceans

Oceans in crisis, science with purpose:
transforming knowledge into hope

September 17–19, 2025

João Sampaio Cultural Center · CITEC/ROBOTICS – CESMAC
Maceió – Alagoas – Brazil



Extended Abstracts · Oral Presentations · E-Posters

Editorial Information

Bibliographical reference. Proceedings of the 2nd International Workshop on Plastic Pollution in the Oceans (IWPPPO 2025), September 17–19, 2025, Maceió, Alagoas, Brazil.

Format. This volume compiles the accepted extended abstracts submitted in Portuguese, English, or Spanish for presentation at II IWPPPO 2025.

Editorial note. Authors are exclusively responsible for the scientific content, language, data, images, and opinions presented in their works.

Copyright. © 2025 II IWPPPO. All rights reserved.

Event	2nd International Workshop on Plastic Pollution in the Oceans (IWPPPO 2025)
Theme	Oceans in crisis, science with purpose: transforming knowledge into hope
Opening venue	João Sampaio Cultural Center, Av. Moreira e Silva, 595, Farol, Maceió-AL
Scientific sessions venue	CITEC/ROBOTICS – CESMAC, Rua Professor Angelo Neto, Farol, Maceió - AL
Contact	iwppo@cesmac.edu.br (82)3215-5021
Supported by	CAPES: PAEP-20253509457P – Global Cooperation and Innovative Public Policies in Combating Ocean Plastic Pollution (Process N°. 88887.013314/2024-00 (Migrated - SICAPES3)) CNPq Maceió Convention Startup Policoncret.

This proceedings volume is organized in a Springer-inspired conference-book layout: opening matter, event information, committees, and the full sequence of accepted works.

Catálogo na Fonte
Departamento de Tratamento Técnico
Bibliotecária responsável: Siméia Santos CRB-4 2377

P963 Proceedings of the 2nd international workshop on plastic pollution in the oceans(2025: Maceió– AL)

Oceans in crisis, science with purpose: transforming knowledge into hope [recurso eletrônico]
Maceió, AL, Brasil.

Programa de Pós-Graduação em Análise de Sistemas Ambientais (PPGASA/CESMAC),2025.

1.IWPPO - Anais. 2.Workshop. 3.Pollution in the Oceans. I. Centro Universitário CESMAC. II.
Programa de Pós-Graduação em Análise de Sistemas Ambientais. III. Título.

CDU: 502.175

Presentation

The **2nd International Workshop on Plastic Pollution in the Oceans (IWPPPO 2025)** was born from the need to discuss and find solutions for one of the most pressing environmental challenges of our time: plastic pollution in marine and coastal ecosystems. Originating from CEMEIA and supported by CAPES and CNPq, the workshop brings together international experts in an interdisciplinary approach, aligned with **SDG 14 – Life Below Water**, international cooperation, and the **UN Decade of Ocean Science**.

Its approach combines **scientific research, public policies, and technological innovation** to strengthen dialogue among researchers, institutions, and society. The event material highlights a broad international scope, more than 500 participants, and the promotion of practical solutions for prevention, monitoring, and mitigation of plastic pollution.

These proceedings gather the accepted works presented at IWPPPO 2025 and are intended to support scientific dissemination, collaboration networks, and future actions in marine conservation, environmental education, sustainable technologies, and territorial governance.

The event also emphasizes a **Zero Waste** mindset, encouraging participants to reduce single-use items and strengthen environmentally responsible practices during the workshop.

The opening roundtable features institutional authorities and representatives, including Douglas Apratto Tenório, João Rodrigues Sampaio Neto, Alexander Turra, Fábio Guedes, Nídia Noemi Fabré, Katia Viana Cavalcante, and Rodrigo Ribeiro Gonçalves Garcia.

Opening Roundtable

- Jessé Marques Pavão - Coordinator of the Graduate Program in Environmental Systems Analysis -PPGASA, CESMAC
- Douglas Apratto Tenório — Vice- Rector of CESMAC
- João Rodrigues Sampaio Neto — Pro-Rector of Management and Planning at Cesmac University Center
- Alexander Turra — Full Professor, USP
- Fábio Guedes Gomes — President Director of FAPEAL
- Nídia Noemi Fabré — Professor, UFAL
- Katia Viana Cavalcante — Researcher, Federal University of Amazonas
- Rodrigo Ribeiro Gonçalves Garcia — Frigate Captain, Brazilian Navy

Confirmed Speakers

- Robson Guimarães dos Santos — UFAL — Presentation of the main results of research from the focal points of the Oceans of Plastic project
- Katia Viana Cavalcante — Federal University of Amazonas — Opening Ceremony
- Scott Paton Wilson — Macquarie University — Closing Ceremony
- Fernando Miguel Granja Martins — University of Algarve — Geotechnologies Applied to the Analysis and Mitigation of Environmental Impacts
- Helena Fernandez — University of Algarve — Territorial Management in the Detection of Plastics in the Oceans
- Cristiane Siqueira — University of Vassouras — Development of biosensors for the detection of pollutants and microplastics in water resources
- Biagio Fernando Giannetti — UNIP — Emergency and Ecological Justice: A New Basis for Shared Responsibility in the Oceans
- Federico Sulis — UNIP — Closing the Cycle: Sustainability Assessment of Cobogós with Marine Plastic Waste
- Marcell Mariano Correa Maceno — UFPR — Life cycle assessment and microplastics: an overview
- Paulina Chamorro — UFPR — Planet or Plastic? Stories from journalistic coverage
- Jemilli Castiglioni Viaggi — UNESCO Chair for Ocean Sustainability – Frontiers of Science and Policy in Addressing Plastic Pollution
- Alireza Moghayeddi -UWE/ University of Cape Town – Recycling plastic pollution into construction solutions for net-zero goals
- Bárbara Ramos Pinheiro — UFPE — Frontiers of Science and Policy in Addressing Plastic Pollution
- Ian Vázquez- Rowe — Pontifical Catholic University of Peru — Emission pathways of macro and microplastics to the Pacific Ocean in Peru: detection and quantification
- Clemilson Marques Batista — Athena Platform — Innovation in the management of Brazilian research and scientific production
- Adilane Lays Xavier Marques — UFAL — Microplastics in the Human Placenta: Evidence in Alagoas and the International Context
- Márcio Gomes Barboza — UFAL — Multi-scalar governance: coordination between basin committees, municipalities, and states in combating plastic pollution
- Ariane Monteiro — Sustainable Territory — Waste management at our events
- Filipa Bessa — University of Coimbra — Assessment of the impacts of human activities, with a special focus on (micro)plastic pollution, in marine ecosystems

Important Dates and Submission Guidelines

Paper Submission	Until September 5, 2025
Acceptance Notification	Until September 8, 2025
Final Submission	Until September 10, 2025
Event Date	September 17–19, 2025
Registration Deadline	Until September 15, 2025

Only **original works** were accepted. Participants could present their work as **oral presentations** or **e-poster/banner**. The accepted format was **extended abstract** only, in **Portuguese, English, or Spanish**. Each paper could contain up to **6 authors/co-authors**; each participant could submit up to **2 papers as main author** and appear in up to **5 papers as co-author**.

The evaluation process occurred in two stages: preliminary steering-committee review and scientific-committee review. Criteria included originality, contribution to the field, methodological rigor, writing quality, and alignment with the state of the art. Papers with an average score of 4 or higher were accepted.

E-poster/banner presentations were designed for a 1-hour display, while oral presentations followed the 10-minute presentation + 5-minute Q&A format.

Organizing Committee

- Jessé Marques Pavão — General chair
- Douglas Apratto Tenório – Vice - Rector of CESMAC
- Selenobaldo Alexinaldo Cabral de Sant'Anna
- Marcelo Reis
- Biagio Fernando Giannetti
- Jacilene Silva de Almeida
- Richard James Ladle - Austrália
- Katia Viana Cavalcante
- Cristiane de Souza Siqueira Pereira
- Fernando J. Días Lopez — México
- Romikson Christiano da Silva Freitas
- Victoria Kamille de Castro Almeida
- Alessandro Sarmento Cavalcanti
- Clarissa Nascimento Soares
- Heitor Barbosa Gomes de Messias
- Kleber Firmino da Silva
- Maria Fernanda Torres dos Santos
- Sue Reginis de Carvalho Moreira e Silva
- Luis Alcides Brandini de Boni
- João Eduardo da Silva Mota

The organizing committee is composed of researchers and collaborators dedicated to scientific production, event management, and institutional articulation around plastic pollution in the oceans.

Scientific Committee

- Feni Dalano Roosevelt Agostinho
- Cecila Maria Vilas Boas de Almeida
- Francisco Carlos Rocha de Barros Junior
- Jairo Lizandro Schmitt
- Ana Claudia Mendes Malhado
- Federico Sulis
- Leticia Anderson Bassi
- Enio Jose Bassi
- Ciro Ramon Felix dos Santos Silva
- Oscarina Viana de Sousa
- Thiago Jose Matos Rocha
- Aldenir Feitosa dos Santos
- Marcell Mariano Correa Maceno

- Thyago Anthony Soares Lima
- Juliana de Carvalho Gaeta
- Lívia Maria Batista Vilela
- Eugenio Dantas Gomes Lima
- João Paulo Lopes da Silva
- Giuliano Aires Anderlini
- Scott Paton Wilson
- Hector Mauricio Casanova Navarro
- Michella Grey Araújo Monteiro
- José Gilmar Cavalcante de Oliveira Júnior

Organization, Support, and Partner Publications

Organization	Cesmac University Center; PPGASA – Graduate Program in Environmental Systems Analysis
Support	CAPES CNPq Maceió Convention Startup Policoncret
Partner publication	Revista Tchê Química (ISSN 1803-0374); Scientific Journal of Fisheries & Aquatic Sciences (e-3-4444)
Venue contact	João Sampaio Cultural Center: contato@centroculturalis.com.br (82)3333-4444 CESMAC: contato@cesmac.edu.br (82)3215-5021

This volume uses the 14th IWACP proceedings as editorial inspiration for the cover hierarchy, bibliographical note, committee presentation, and compact table-of-contents organization.

Table of Contents

NuviMobi: um aplicativo de alerta de rotas em dias chuvosos	15
Exploring the nexus of circular economy and ocean plastic pollution: a knowledge mapping with bibliometric and topic modeling methods	19
Cidades inteligentes: análise dos indicadores da dimensão de meio ambiente no cenário internacional e nacional	26
Oceano em Perigo, a invasão microplástica: Jogo Interdisciplinar para a Educação Ambiental no Ensino Médio	29
Educação Ambiental Gamificada Para Reciclagem – Impactos E Avaliação De Engajamento E Performance Em Estudantes.....	38
O CRESCIMENTO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEU POTENCIAL POLUIDOR: UM ESTUDO NA CIDADE DE MACEIÓ	43
Fuligem da cana-de-açúcar e os Polímeros Plásticos Reciclados como substitutos parciais dos componentes do concreto: Resultados Preliminares	47
Análise Climatológica da precipitação para o estado de Alagoas para 2024, com foco nas áreas acumuladoras de detritos flutuantes na região do CELMM.	53
Otimização multissensor para detecção de plásticos marinhos: estado da arte de abordagens drone-para-satélite	56
Casca do Coco e Polímeros Plásticos:Resultados Preliminares	66
Impressão 3D e Sustentabilidade: Desenvolvimento de Moldes para Cobogós em Concreto com Polímeros Reciclados Inspirados no Filé Alagoano.....	69
Detection of Bacteria and Antibiotic Resistance Genes on Marine Plastics from the Coast of Maceió, Brazil	74
Social technology with production of sustainable concrete: The case of the municipality of Santa Luzia do Norte in Alagoas.....	79
Relation between plastic waste leakage in the oceans and socioeconomic factors: A statistical and wavelet coherence analysis	85
Entre pessoas e rios: Padrões de descarte irregular de resíduos sólidos em Maceió	92
Informativo Técnico sobre Resíduos de Serviços de Saúde: Impactos do Descarte Incorreto na Saúde Humana e no Meio Ambiente	97

A disponibilidade do plástico em ecossistemas costeiros	101
ALGA NÃO É LIXO, É LUXO.....	106
Assessment of the spatial distribution and quantification of microplastics in the Parnaíba Delta	110
Avaliação da Qualidade da Água do Riacho Pau d'Arco como Indicador de Impactos Antrópicos em Bacia Urbana	115
Comparison of non-structural concretes with replacement of plastic polishes and traditional aggregates	121
Contaminação microplástica em praias urbanas de Maceió, Alagoas.....	127
Entre Turismo e Conservação: A Necessidade de Atualização da Legislação para Piscinas Naturais Urbanas.....	131
Esclarecendo sobre a seleção de alimentos e ingestão de microplásticos em zebrafish (<i>Danio rerio</i>): um estudo experimental	135
First records of floating debris in the Costa dos Corais Environmental Protection Area from remote sensing (Sentinel 2/FDI).....	141
Impacto do Plástico na Saúde Aviária: A importância do diagnóstico por imagem na detecção de corpos estranhos.....	147
Inovação e Sustentabilidade: Uma proposta de Tecnologias Sociais para Economia Circular em Quilombos Litorâneos	152
Integração de soluções baseadas na natureza em ambientes litorâneos: estratégias para controle do escoamento em áreas em processo de urbanização	155
IPTU Verde e Gestão Costeira: Potencial para a Redução da Poluição Marinha nas Cidades Litorâneas Brasileiras.....	160
Microplastics in Urban River Sediments: Implications for Water Management and Continental Input to the Oceans	101
Morphological Characterization of Microplastics in Sediments of the Itapecuru River (MA) and their Relationship with Physical-Chemical Parameters	107
Percepções de estudantes do ensino fundamental sobre os impactos dos plásticos nos oceanos	113
PescApp: inovação tecnológica para monitoramento da pesca artesanal e quantificação de plásticos nos oceanos.	117
Time required for the complete degradation of microplastics in marine and terrestrial environments: influence of polymer type, shape, and weathering.....	123

Tipificação dos detritos plásticos encontrados nas carcaças de tartarugas verdes (<i>Chelonia mydas</i>) no litoral brasileiro: revisão de literatura.....	130
--	-----

NuviMobi: um aplicativo de alerta de rotas em dias chuvosos

Maria Silva¹, Nyvea Rodrigues², Erika Lins³ and Diego Santos⁴

¹ IFAL - Instituto Federal de Alagoas Campus Benedito Bentes; meds2@aluno.ifal.edu.br

² IFAL - Instituto Federal de Alagoas Campus Benedito Bentes; nvlr1@aluno.ifal.edu.br

³ IFAL - Instituto Federal de Alagoas Campus Benedito Bentes; ewfl1@aluno.ifal.edu.br

⁴ IFAL - Instituto Federal de Alagoas Campus Benedito Bentes; diego.daguia@ifal.edu.br

* Correspondence: meds2@aluno.ifal.edu.br;

Abstract: Este trabalho visa abordar os desafios de mobilidade urbana em dias de chuvas intensas, em que alagamentos e resíduos sólidos ampliam riscos em centros urbanos. O objetivo central foi propor uma solução tecnológica alinhada ao conceito de cidades inteligentes, capaz de reduzir impactos das enchentes e melhorar a acessibilidade da população. A metodologia baseou-se em revisão bibliográfica e documental, análise de aplicativos de alerta já existentes e estudo exploratório com entrevistas a usuários, além de dados do IBGE e literatura científica recente. Os resultados apontam para o desenvolvimento do protótipo NuviMobi, um aplicativo de rotas seguras que auxilia cidadãos a evitar áreas de riscos durante chuvas, contribuindo para a prevenção de acidentes e doenças associadas a enchentes. O sistema prevê integração com sensores climáticos e semáforos inteligentes, favorecendo especialmente comunidades vulneráveis. Conclui-se que a ferramenta tem potencial para apoiar políticas públicas, estimular a conscientização ambiental e fortalecer a resiliência urbana em consonância com a ODS 11.

Keywords: alagamentos urbanos; resíduos sólidos/plásticos; cidades inteligentes.

1. INTRODUCTION

A Lei nº 12.587/2012 define mobilidade urbana como condição em que se realizam os deslocamentos de pessoas e cargas no espaço urbano. Este conceito denominou a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), que busca facilitar o deslocamento e proporcionar uma cidade com mais facilidade de acesso [1]. A mobilidade urbana é essencial para o direito ao acesso urbano, influenciando diretamente o cotidiano dos cidadãos [2]. No cenário do Brasil, o crescimento desordenado das cidades, a priorização do transporte individual e a desigualdade urbana intensifica os desafios da mobilidade, impactando principalmente populações vulneráveis [3][4].

As enchentes e alagamentos, sendo assim, tornam-se um desafio à mobilidade urbana, sendo que o acúmulo de água em áreas impermeabilizadas dificulta a locomoção e aumenta riscos à população, além disso têm como consequências fatores naturais e antrópicos, [5]. Do mesmo modo, o descarte inadequado de resíduos sólidos contribuem para o bloqueio de bueiros e canais, fortalecendo as inundações e favorecendo a disseminação de doenças como dengue, leptospirose e hepatite A [6][7]. Dados da ANA (2023) e do IBGE (2019) indicam que milhões de brasileiros estão expostos a riscos expandidos durante chuvas intensas. Enquanto a revisão global MacAfee et al. (2024) indica como resíduos plásticos e outros rejeitos prejudicam drenagens e agrava as enchentes urbanas, aumentando as desigualdades socioespaciais [8][9].

Com base nesse cenário, soluções baseadas em tecnologias inteligentes, alinhadas ao conceito de cidades inteligentes, surgem como alternativas de mitigar os riscos, melhorar a mobilidade urbana e monitorar áreas suscetíveis a alagamentos [10][11]. O presente estudo propõe um aplicativo de rotas seguras, que contribui para a prevenção de acidentes e o planejamento de deslocamentos em dias chuvosos, oferecendo uma estratégia prática para mitigar os impactos do lixo urbano em enchentes e alagamentos.

1. MATERIALS AND METHODS

Este estudo tem como base em revisão bibliográfica e análise documental sobre alagamentos, resíduos sólidos/plásticos e mobilidade urbana. Foram utilizados dados secundários da ANA [7] e do IBGE [8], além de publicações científicas recentes, como MacAfee et al. [9], que trazem a relação entre resíduos plásticos e inundações urbanas.

A análise é qualitativa, foca em identificar padrões e compreende os fatores que dificultam a acessibilidade e ampliam os riscos durante eventos de chuvas intensas [12][13][14]. O levantamento bibliográfico inclui artigos, livros, teses e dissertações de fontes acadêmicas reconhecidas, o que garante uma base teórica sólida.

A pesquisa também envolveu estudo exploratório, com análise de aplicativos de alerta de chuva, e fundamentação teórica sobre sistemas de monitoramento de riscos.

Por fim, este trabalho prevê a realização de uma pesquisa aplicada, com o objetivo de propor uma solução prática para a dificuldade de acesso a alertas meteorológicos claros, precisos e acessíveis para a população. Atualmente, o protótipo do aplicativo de alerta de rotas em dias chuvosos está em desenvolvimento e deverá passar por validação futura. Em continuidade, o projeto prevê a criação de um sistema integrado de alertas de chuvas, que combina o aplicativo móvel com sensores de monitoramento climático e semáforos inteligentes em pontos críticos da cidade.

O protótipo do NuviMobi está sendo desenvolvido no Figma, para a criação da interface e da experiência do usuário, bem como no Thunkable, que possibilita a transformação do design em um aplicativo interativo. A versão inicial busca disponibilizar alertas personalizados sobre rotas em dias de chuvas intensas, utilizando pontos críticos de alagamento previamente mapeados, além de notificações em tempo real e mapas interativos, de maneira a contribuir para a mobilidade urbana e amenizar durante eventos críticos climáticos. Este passo é primordial para a validação futura e integração do sistema com sensores de monitoramento climático e semáforos inteligentes em áreas suscetíveis e estratégicas da cidade.

2. RESULTS

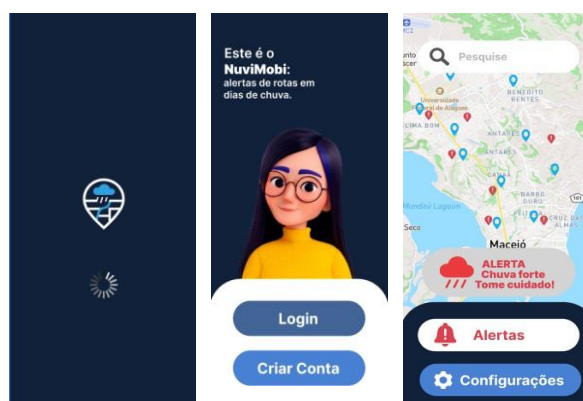
Este trabalho visa melhorias na mobilidade urbana em dias de chuvas intensas, por meio de um aplicativo que oferece rotas seguras que contribuam para reduzir riscos durante chuvas intensas, oferecendo caminhos alternativos que garantem maior segurança e acessibilidade à população.

A ferramenta indica caminhos alternativos que garantam maior segurança e acessibilidade, evitando áreas alagadas que dificultam a locomoção e expõem os cidadãos a situações de vulnerabilidade.

Dessa forma, além de minimizar atrasos e acidentes, o aplicativo também desempenha um papel fundamental na proteção da saúde, ao reduzir a exposição a doenças de veiculação hídrica, leptospirose e dengue, frequentemente associadas a enchentes e inundações urbanas. A proposta não se limita a uma solução tecnológica isolada, mas prevê a integração com sensores climáticos e semáforos inteligentes em pontos críticos da cidade, formando um sistema de alerta dinâmico, em tempo real e acessível a todos.

Em síntese, a iniciativa vai além da mitigação imediata dos impactos das chuvas. Ela representa um passo em direção à construção de cidades mais resilientes, inclusivas e sustentáveis, alinhando-se diretamente à Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012) e ao objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS 11), que trata de tornar os espaços urbanos mais seguros, acessíveis e preparados para os desafios ambientais do presente e do futuro.

Figura 1 - Protótipo do aplicativo de alerta de rotas em dias chuvosos. Fonte: Dados da pesquisa, 2025.



Descrição: O protótipo do NuviMobi foi desenvolvido para ajudar as pessoas em dias de chuvas fortes, oferecendo rotas seguras e informações rápidas sobre áreas de risco. Nele já é possível visualizar as telas de login e criação de conta, com acesso simples por e-mail ou conta Google. A interface tem um design limpo em tons de azul e conta com um personagem que dá boas-vindas, tornando a experiência mais leve e próxima do usuário.

Na tela principal, o aplicativo exibe um mapa interativo com marcadores que indicam pontos de atenção na cidade e emite alertas visuais de risco, como avisos de alagamento e chuvas intensas. Também estão disponíveis atalhos para Alertas e Configurações, reforçando a proposta de ser uma ferramenta prática, intuitiva e que promove mais segurança no dia a dia.

3. DISCUSSION

Os resultados do NuviMobi se alinham com práticas internacionais, mostrando a importância no cenário nacional e internacional. No Reino Unido, o FloodAlert [15] fornece alertas em tempo real a partir de dados meteorológicos e hidrológicos, permitindo o planejamento por partes dos moradores antecipadamente.

Já o MyCoast [16], nos Estados Unidos, adota uma abordagem participativa, reunindo registros da população sobre tempestades e inundações, fortalecendo a conscientização social e participação por parte dos cidadãos.

O aplicativo Waze [17], de origem Israelense, é focado principalmente para a navegação no tráfego e trânsito em tempo real. Ele funciona com base no compartilhamento de informações sobre o trânsito, acidentes e obstáculos. Apesar da sua eficiência, seu foco é voltado ao tráfego de veículos, contudo o NuviMobi se concentra em situações de risco relacionados com as chuvas, oferecendo uma abordagem voltada à proteção civil.

No Brasil, sistemas como o SACE [18], O Cemaden Educação [19] e o Defesa Civil Alerta [20] demonstram atuação na prevenção de desastres, sendo este último responsável por um sistema de alerta via SMS para as comunidades expostas no Brasil. Entretanto, contém desafios de acessibilidade para a população mais vulnerabilizada e clareza nas informações.

O Nuvimobi tem o diferencial de integrar mobilidade urbana, monitoramento climático e educação ambiental em uma única plataforma, oferecendo rotas seguras e acessibilidade para as pessoas.

4. CONCLUSIONS

O NuviMobi mostrou-se uma ferramenta propícia para mitigar riscos durante chuvas intensas, melhorar a mobilidade urbana e colaborar com políticas públicas. O protótipo inclui dados de mobilidade, informações climáticas e apoia ações governamentais. As próximas etapas incluem validação com usuários, maior integração com sistemas públicos e mapeamento completo de indicadores de risco, integrando o aplicativo ao cotidiano das cidades brasileiras.

REFERENCES

1. BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui a Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 jan. 2012.
2. FLORENTINO, J. Mobilidade urbana e direito à cidade. Revista Brasileira de Estudos Urbanos, 2011.
3. RODRIGUES, L. Mobilidade urbana no Brasil: desafios e desigualdades. Revista de Planejamento Urbano, 2016.
4. CÂNDIDO, P. Acesso e exclusão na mobilidade urbana. Revista de Ciências Sociais, 2022.
5. LICCO, A.; MAC DOWELL, F. Enchentes e alagamentos: causas e impactos. Revista de Engenharia Ambiental, 2015
6. CUNHA, R. Impactos dos alagamentos na saúde pública. Revista de Saúde Coletiva, 2016.
7. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe anual de 2023. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/101813.
8. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB). Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html>.
9. MACAFEE, E. A.; LÖHR, A. J. Multi-scalar interactions between mismanaged plastic waste and urban flooding in an era of climate change and rapid urbanization. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 11, n. 2, p. e1708, 2024. Disponível em: <https://research.ou.nl/en/publications/multi-scalar-interactions-between-mismanaged-plastic-waste-and-urban-flooding-in-an-era-of-climate-change-and-rapid-urbanization>.
10. YEH, B. Smart Cities: conceitos e aplicações. 2017.
11. ANDRADE, L. et al. Participação cidadã e cidades inteligentes. Revista de Administração Pública, 2023.
12. MARTELLI, A. et al. Metodologia de pesquisa aplicada: fundamentos e práticas. São Paulo: Editora Atlas, 2020.
13. GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
14. COLLIS, J.; HUSSEY, R. Pesquisa em administração: um guia prático para estudantes. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
15. FLOODALERT. FloodAlert – Real-time river and flood monitoring. Disponível em: <https://www.floodalert.co.uk>.
16. MYCOAST. MyCoast – Community-based coastal storm tracking. Disponível em: <https://mycoast.org>.
17. WAZE. Waze: GPS, Mapas & Trânsito. Disponível em: <https://www.waze.com/>.
18. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Sistema de Alerta de Cheias (SACE). Disponível em: <https://www.ana.gov.br>.
19. CEMADEN. Cemaden Educação – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Disponível em: <http://www.cemaden.gov.br>.
20. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (Brasil). Defesa Civil – Defesa Civil Alerta. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/defesa-civil-alerta>.

Exploring the nexus of circular economy and ocean plastic pollution: a knowledge mapping with bibliometric and topic modeling methods

Julia Santos Humberto ^{1*}, Marcelo Seido Nagano¹

¹ University of São Paulo, julia.s.humberto@usp.br, drnagano@usp.br

* Correspondence: julia.s.humberto@usp.br

Abstract: Research on plastic pollution in oceans and its relationship with Circular Economy (CE) strategies has grown rapidly, yet a comprehensive knowledge map capturing the intellectual structures, thematic patterns, and research fronts of this field is still missing. This study addresses this gap by analyzing 206 scientific publications through a dual approach combining bibliometric analysis and Latent Dirichlet Allocation (LDA). Results indicate that CE in this context is predominantly associated with technological innovations such as recycling, pyrolysis, and bioplastics, complemented by policy frameworks including single-use plastic bans, while social and governance dimensions remain comparatively underexplored. The analysis also reveals strong geographical imbalances, with limited contributions from the Global South. These findings provide a foundation for advancing research and guiding policy toward more inclusive, systemic, and globally relevant CE strategies to mitigate marine plastic pollution.

Keywords: plastic pollution; oceans; circular economy; bibliometric analysis; topic modeling.

1. INTRODUCTION

Plastic pollution in oceans and seas has become one of the most pressing global environmental challenges, threatening marine ecosystems, human health, and the sustainability of food and economic systems. In recent years, the Circular Economy (CE) has gained prominence as a transformative paradigm to address this challenge, shifting from linear production models toward strategies that prioritize waste minimization, efficient recycling, and the use of innovative technologies to convert discarded plastics into value-added products [1].

Research on plastic pollution in the oceans and its relationship with CE strategies has expanded considerably in recent years. However, a structured overview of how this knowledge has evolved, how it is geographically distributed, and what thematic patterns, latent structures, and emerging research fronts define the field is still lacking. To address this need, the present study aims to develop a comprehensive knowledge map of scientific publications at the intersection of CE strategies, plastic pollution, and marine environments. To guide this investigation, two research questions (RQs) were formulated:

RQ1: How has the scientific literature on CE strategies and marine plastic pollution evolved in terms of publication trends, geographical distribution, collaboration networks, thematic mapping, and research fronts?

RQ2: What latent thematic structures and conceptual linkages emerge within this body of literature, and how do they reveal how CE is connected to marine plastic pollution?

The study was based on the analysis of 206 scientific publications and employed a dual methodological approach. First, a bibliometric analysis was carried out using the bibliometrix package in R, an open-source tool specifically developed for science mapping and bibliometric studies [2]. Second, Latent Dirichlet Allocation (LDA) was applied, a generative probabilistic model widely used in text mining and natural language processing

to uncover latent thematic structures within large document collections [3]. To ensure transparency and replicability in the process of article selection, the PRISMA protocol (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) was applied [4]. The article selection process adhered to the PRISMA framework, encompassing the steps of identification, screening, eligibility, and inclusion [5].

This study makes pioneering contributions as the first to develop a comprehensive knowledge map linking CE strategies, plastic pollution, and ocean sustainability. By combining

bibliometric analysis with topic modeling (LDA), it provides both a structural overview and a deeper thematic exploration, revealing latent themes and emerging research fronts. The findings establish a novel baseline for advancing scholarship and policy, highlighting well-developed and underexplored themes, as well as geographical imbalances, to inform more inclusive and systemic solutions to the plastic pollution crisis.

2. MATERIALS AND METHODS

The present study is a knowledge mapping study aimed at analyzing the intersection between CE strategies, plastic pollution, and ocean sustainability. Data were collected from the Web of Science (WoS) database, which initially yielded 221 documents. To ensure transparency and replicability, the screening and selection process followed the steps of the PRISMA protocol. In the identification phase, 221 records were retrieved. During screening, articles without full-text access were excluded, leaving 207 records. In the eligibility phase, one article was removed for not being published in English, resulting in 206 articles. Finally, in the inclusion phase, these 206 articles were retained for analysis.

The methodological approach was structured into two complementary stages. In the first stage, a bibliometric analysis was conducted to evaluate country-level scientific production, collaboration networks, keyword frequency through word cloud visualization, thematic mapping of research fronts, and the identification of trend topics. These outputs provided a comprehensive structural overview of the research landscape. In the second stage, LDA was employed to identify latent thematic structures and interconnections within the corpus, thereby clarifying how CE strategies are conceptually linked to marine plastic pollution. Unlike keyword frequency analysis, which captures only surface-level patterns, LDA detects latent semantic structures, revealing conceptual linkages that may not be explicitly evident in the text.

3.1. Bibliometric Insights into CE and Marine Plastic Pollution

Research linking CE, plastic pollution, and oceans is a young but fast-growing field, with 221 publications from 2017 to 2025 and a 29% annual growth rate. It is highly collaborative (1,052 authors, 5 co-authors per paper, 38% international collaboration) and interdisciplinary, spanning sustainability, waste management, marine ecology, and materials science. Figure 1 presents an overview of publications linking CE, plastic pollution, and oceans.

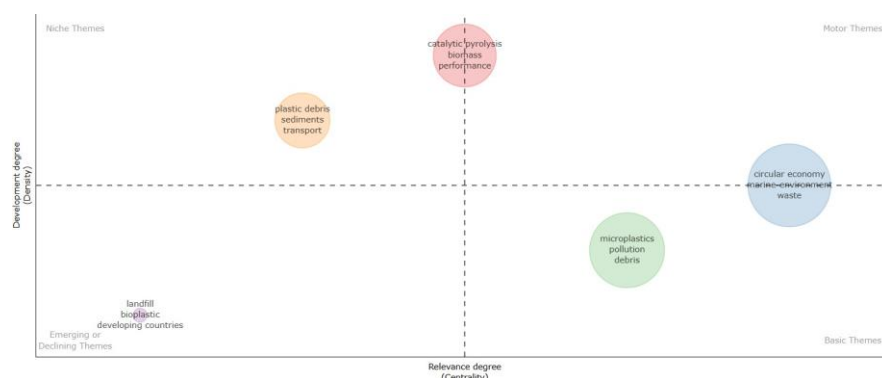


Figure 1. Main bibliometric statistics of publications linking CE, plastic pollution, and oceans.

dominated by recycling (23), plastic waste (18), waste management (14), and plastic recycling (11), highlighting post-consumption interventions as dominant CE strategies; (iii) Framing Concepts & Broader Narratives, including sustainability (16) and plastics (14), situating the debate within wider systemic transitions. These patterns suggest that while scholarship strongly documents pollution impacts and recycling-oriented solutions, upstream measures such as prevention, eco-design, and reduction remain underrepresented.

The thematic map of research on the theme further illustrates how the field is structured around distinct but interconnected research fronts. Figure 4 illustrates this thematic structure.

Figure 4. Thematic map of research themes related to CE, plastic pollution, and the oceans.



The thematic map indicates that motor themes such as *catalytic pyrolysis*, *biomass*, and *performance* represent a well-developed research front focused on waste valorization and thermochemical conversion within CE principles. Basic themes such as *CE*, *marine environment*, *waste*, and *microplastics* reflect broad relevance but limited conceptual consolidation, while niche themes (e.g., *plastic debris*, *sediments*, *transport*) capture specialized studies on the environmental fate of plastics. Emerging or declining themes, including *landfill*, *bioplastics*, and *developing countries*, highlight peripheral or nascent debates with potential to expand if better integrated into sustainability and policy agendas. Overall, the map shows a field evolving from descriptive accounts of pollution impacts toward technological and systemic CE-oriented solutions.

In terms of trend topics, a clear trajectory emerges: the field has progressively shifted from a focus on specific issues, such as packaging and marine litter, toward systemic frameworks encompassing CE, recycling, and biodegradation, as illustrated in Figure 5.

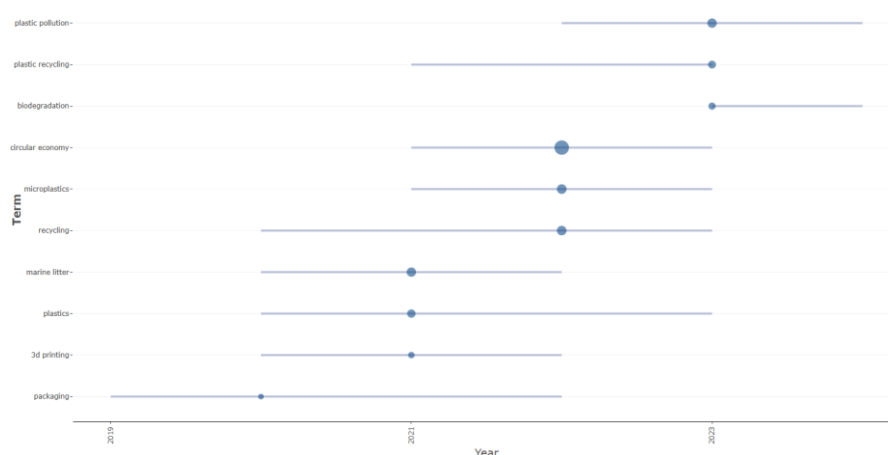


Figure 5. Temporal dynamics of emerging topics in CE and Ocean Plastic Research

The most recent period is characterized by the rise of *plastic pollution* and *plastic recycling* as dominant themes, underscoring the field's maturation toward integrated solutions that align environmental governance, technological innovation, and circular

models. The emergence of *biodegradation* further reflects growing scientific interest in eco-innovative and biological pathways to address the persistence of plastics in marine environments. The trajectory suggests that future research will likely converge on the nexus of technological innovation, environmental governance, and circular models as the dominant paradigm in addressing ocean plastic pollution.

3.2. Exploring Emerging Themes through Topic Modeling

To deepen the understanding of the intellectual structure of the field, topic modeling was applied to the corpus of abstracts using LDA. This approach allowed the identification of latent themes and emerging research fronts, which are summarized in Table 1.

Table 1. Thematic patterns in CE and ocean plastic research

Topic	Main Words	Label	Weight (%)
1	Materi, sampl, recycle, process, composit, analysi, polym, result, valu, differ	Material analysis and composites in recycling	13
2	Studi, model, design, product, consum, research, user, data, inform, system	Studies on innovation in product and system design	6
3	Microplas, environ, pollut, water, sci, soil, particl, health, human, effect, plastic, wast, product, pyrolysi	Microplastics, pollution, and health impacts	13
4	Carbon, PET, catalyst, process, recycle, chemic	Plastic waste valorization and pyrolysis solutions	14
5	Biodegrad, degrad, polym, materi, food, film, product, plastic, bioplastic, environ	Biodegradation and bioplastics pathways	6
6	Marin, plastic, pollut, litter, debri, ocean, sean, fish, environ, item, plastic, wast, recycle, manag, product	Marine plastic pollution and ocean debris	13
7	Sustain, circular, materi, environment, economi	Plastic waste management and circular economy strategies	36

The topic “Material analysis and composites in recycling” reflects research efforts aimed at transforming plastic waste into value-added materials through composite development. The literature emphasizes processes such as mechanical recycling, extrusion, and additive manufacturing (e.g., 3D printing), while also exploring the incorporation of bioadditives such as lignin-derived biocarbon and mussel shells to enhance mechanical and thermal performance. Across these studies, analytical techniques, including mechanical testing, spectroscopy, thermal analysis, and morphological characterization, are employed to evaluate the properties of recycled polymers and compare them with virgin or modified materials. This body of work highlights how systematic testing and material innovation contribute to the creation of higher-value products, reinforcing the role of recycling within CE strategies.

The topic “Studies on innovation in product and system design” reflects the scientific and industrial research perspective on plastics, with emphasis on how product design, modeling, and systemic frameworks can support circularity. It encompasses studies that investigate consumer behavior, decision-making models, and digital information systems, as well as experimental approaches in polymer formulation and waste tracking. Together, these studies highlight the importance of integrating user perspectives, data-driven insights, and systemic design approaches to guide sustainable product innovation and the transition toward a circular plastics economy.

The topic “Microplastics, pollution, and health impacts” focuses on microplastic pollution as an emerging environmental and human health issue, highlighting how tiny plastic particles, originating from conventional plastics, bioplastics, solid waste, and wastewater, are now pervasive in soils, rivers, and marine ecosystems. Once released, they act as carriers of harmful chemicals and heavy metals, posing risks to biodiversity by impairing reproduction, growth, and feeding in aquatic and terrestrial organisms, while also entering the food chain and threatening human health through bioaccumulation and biomagnification. Their ubiquity in water, soil, and air underscores the challenge of

detection and management, especially given their ability to fragment into even smaller nanoplastics. Addressing these impacts requires advancing standardized monitoring methods, integrating pollution control into CE strategies, and implementing regulatory frameworks that reduce plastic leakage, encourage sustainable alternatives, and protect ecosystem and human well-being.

The topic “Plastic waste valorization and pyrolysis solutions” focuses on thermochemical recycling methods, especially pyrolysis and catalytic conversion, to transform plastic waste into fuels, chemicals, and carbon-based products. It highlights the production of activated carbon and carbon nanotubes as high-value outputs, alongside oils and gases for energy recovery. Co-pyrolysis with biomass emerges as a synergistic strategy that enhances fuel quality and calorific value. By diverting plastics from landfills and incineration, these technologies reduce environmental impacts and support the transition to a circular, low-carbon plastic economy.

The topic “Biodegradation and bioplastics pathways” focuses on biodegradable polymers and bioplastics as sustainable alternatives to conventional plastics, particularly in food packaging and films. It highlights materials such as PHA, PLA, starch-based blends, and cellulose foams, which are engineered to degrade in soil, compost, and marine environments, reducing long-term persistence. Research addresses testing methods, environmental performance, and nanotechnology-enhanced barrier properties, while also exploring biotechnological enzyme solutions for circularity. Despite challenges in cost and mechanical performance, these bioplastics are positioned as key enablers of a circular and bio-based economy.

The topic “Marine plastic pollution and ocean debris” examines the presence, sources, and ecological impacts of marine litter and plastic debris in oceans, seas, and coastal zones. Plastics, ranging from macro-debris (fishing nets, ropes, bottles, packaging materials) to meso- and microplastics, accumulate through land-based inputs (runoff, rivers, mismanaged waste) and sea-based activities (fishing, aquaculture, shipping). Regional studies (Hawaii, Mediterranean, Malaysia, Greece, Norway) reveal both local variations in debris types and global commonalities in impacts. The topic underscores the urgency of monitoring, prevention, and CE solutions such as fishing gear management, recycling innovations, and stronger policy frameworks to reduce plastic leakage into marine ecosystems.

The topic “Plastic waste management and circular economy strategies” focuses on plastic waste management through CE principles, stressing the redesign, reuse, and recycling of plastic products to reduce environmental impacts and economic losses. It addresses policies, technologies, and behavioral shifts needed to curb marine litter and mismanaged waste, while highlighting opportunities in material recovery, innovation, and sustainability. By closing the loop in plastics’ lifecycle, this approach aligns with SDGs, fosters greener industries, and transitions societies toward sustainable material economies.

This study advances understanding of CE strategies and marine plastic pollution by delivering the first systematic mapping of the field, combining bibliometric analysis and topic modeling to reveal both structural dynamics and latent conceptual linkages overlooked in earlier research.

The application of LDA provided a novel contribution by uncovering latent thematic structures, showing that CE is most frequently associated with technological innovations (e.g., recycling systems, bio-based materials) and, to a lesser extent, with policy frameworks (e.g., bans on single-use plastics). At the same time, social and governance dimensions remain comparatively underexplored, reinforcing the view that current scholarship largely frames CE as a technical and policy-driven response to marine plastic pollution. This imbalance points to critical gaps in systemic, socio-cultural, and behavioral perspectives. In the broader context, the findings highlight the risk of overlooking integrative solutions that combine technological innovation with social acceptance, governance mechanisms, and cross-regional cooperation. Future research should aim to bridge these gaps by (i) expanding empirical evidence from the Global South, where marine plastic pollution is particularly severe; (ii) investigating the role of education, behavioral change, and stakeholder engagement in CE transitions; and (iii) conducting comparative analyses that assess the effectiveness of CE-based interventions across diverse policy and cultural contexts. Addressing these directions can foster more inclusive, effective, and globally relevant strategies for mitigating marine plastic pollution. This study contributes by advancing theoretical understanding of CE–plastic research, offering practical guidance for

policymakers through the identification of dominant and neglected dimensions and providing a strategic baseline for more systemic and globally relevant approaches to marine plastic governance.

This study has limitations, as the analysis relied exclusively on WoS records, potentially omitting relevant studies indexed in other databases such as Scopus. In addition, the interpretation of LDA topics involves a degree of subjectivity, particularly in the processes of labeling.

Funding: This research was financially supported by the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), Brazil [Grant No. 88887823682202300].

Conflicts of Interest: The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

REFERENCES

1. Bozognia Tabary, S. A. A., & Fayazfar, H. R. (2025). Circular economy solutions for plastic waste: Improving rheological properties of recycled polyethylene terephthalate (r-PET) for direct 3D printing. *Progress in Additive Manufacturing*, 10(4), 2795–2804. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00784-w>
2. Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). *bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis*. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
3. Blei, D. M., Ng, A. Y., & Jordan, M. I. (2003). *Latent Dirichlet Allocation*. *Journal of Machine Learning Research*, 3, 993–1022.
4. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
5. Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). *Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement*. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Cidades inteligentes: análise dos indicadores da dimensão de meio ambiente no cenário internacional e nacional

Laura Sales¹, Lilyan Santos², Manuela Tavares³ and Diego Santos⁴

¹ IFAL - Campus Benedito Bentes; loss2@aluno.ifal.edu.br

² IFAL - Campus Benedito Bentes; lgs4@ifal.edu.br

³ IFAL - Campus Benedito Bentes; mst7@aluno.ifal.edu.br

⁴ IFAL - Campus Benedito Bentes; diego.daguia@ifal.edu.br

* Correspondence: diego.daguia@ifal.edu.br; +55 (82) 99930-0813

Abstract: A urbanização e a industrialização intensificaram desafios ambientais, entre eles as mudanças climáticas, que afetam diretamente os ecossistemas marinhos. Nesse cenário, as cidades inteligentes surgem como uma estratégia para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente no que se refere à sustentabilidade ambiental. Dessa forma, este estudo, de natureza básica, descritiva e qualitativa, analisou os relatórios IESE Cities in Motion e Connected Smart Cities, com foco na dimensão de meio ambiente, a fim de verificar se contemplam indicadores voltados à preservação dos oceanos. Os resultados evidenciam que não há presença de ações específicas para a conservação marinha, entretanto, eles apresentam contribuições indiretas, como a redução de emissões de gases de efeito estufa, o tratamento de esgoto, a reciclagem de resíduos sólidos e plásticos e entre outros. Tais indicadores auxiliam na mitigação de problemas que impactam os oceanos, como o aquecimento global, a acidificação e a poluição hídrica. Portanto, conclui-se que há uma lacuna de métricas voltadas diretamente à preservação oceânica, corroborando a hipótese de que é necessário desenvolver novos indicadores específicos alinhados à Década dos Oceanos da ONU, a fim de fortalecer práticas urbanas sustentáveis e promover o desenvolvimento tecnológico e ambiental das cidades.

Palavras-chave: Meio ambiente; sustentabilidade; Cidades Inteligentes; Comunicação científica.

1. INTRODUCTION

A urbanização e a industrialização trouxeram muitas transformações para a sociedade contemporânea. Entretanto, como consequência deste avanço, também trouxe muitos impactos ambientais e sociais, entre eles as mudanças climáticas [1]. Em uma perspectiva histórica, os últimos 65 milhões de anos da história da Terra, as mudanças climáticas tiveram impactos significativos nos padrões de vida oceânica [2]. De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM) [3], 2024 foi o ano mais quente já registrado, com cerca de 1,55°C acima do nível pré-industrial. Esse cenário resultará na intensificação de desafios ambientais já existentes.

Com o objetivo de mitigar esses desafios, a ONU (Organização das Nações Unidas) propôs uma agenda com Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que apontaram implementações de políticas econômicas, ambientais, sociais, tecnológicas e sustentáveis até o ano de 2030 [4]. No total há 17 objetivos, como “Cidades e Comunidades Sustentáveis”, “Consumo e produção sustentáveis”, “Vida na água”, “Vida terrestre” e “Ação contra a mudança global do clima”; ODSs esses que estão contemplados neste projeto.

Nessa lógica, o ODS 11 tem como propósito tornar as cidades mais inclusivas, seguras e sustentáveis. Diante dessa meta, as cidades inteligentes surgem como um caminho estratégico para alcançar esses objetivos, auxiliando na resolução de desafios urbanos a fim de assegurar a qualidade de vida das gerações presentes e futuras [5].

Em vista da difusão desse termo, não há um consenso sobre sua definição, e isso expressa a necessidade dele ter uma flexibilidade e adaptação a cada tipo de contexto econômico, social e

cultural [6]. Nesse contexto, as cidades inteligentes são uma solução para os variados desafios urbanos e ambientais e a implementação de tecnologias em urbanizações pode levar a mudanças significativas na educação, na saúde e na sustentabilidade [7].

Sob essa ótica, como não existe uma definição única para *smart cities*, também não há um consenso sobre quais dimensões e/ou domínios representam esse modelo de cidades, ou seja, cada autor compreende as dimensões das cidades inteligentes de acordo com seus interesses acadêmicos [8].

Dessa forma, Giffinger et al [9] propõem seis dimensões sendo elas: *smart economy* (economia inteligente), *Smart People* (pessoas inteligentes), *smart governance* (governança inteligente), *smart mobility* (mobilidade inteligente), *smart environment* (ambiente inteligente), *smart living* (vida inteligente). Nesse contexto, Rosas[10] analisou 10 modelos de estudos sobre cidades inteligentes propostos por vários autores, no qual é possível analisar a presença de alguns domínios em comum, como a dimensão de meio ambiente.

Uma das dimensões essenciais das *smart cities* é a relação com o meio ambiente. O autor ainda destacou que as discussões ambientais têm sido um tema relevante e cada vez mais constante na literatura científica sobre cidades. Essa abordagem ganhou maior ênfase durante a década de 60 devido à intensificação da produção industrial e da exploração dos recursos naturais [11].

Nesse contexto, a comunicação científica se torna essencial para a prática da ciência, permeando e todas as etapas do processo de pesquisa, utilizando estratégias como ações educativas e uso de tecnologias digitais para aproximar a sociedade do conhecimento científico [12].

Com esse propósito, Berrone e Ricart [13] em parceria com a Universidade de Navarra, publicaram em 2014 um relatório denominado IESE *Cities in Motion*, que visa entender e classificar cidades em desenvolvimento e suas respectivas ações. Todo ano é publicado um novo relatório, no qual é atribuído um valor denominado Índice de Cidades em Movimento (CIMI).

Em sua última edição (10ª), foi realizado um levantamento em 183 cidades. O relatório posiciona as seis cidades brasileiras na dimensão de meio ambiente nas seguintes posições: Curitiba na 67ª posição, seguido por Rio de Janeiro em 88ª, Belo Horizonte em 101ª, Salvador em 106ª, São Paulo em 108ª e Brasília em 117ª lugar.

No cenário nacional, outro relatório que merece destaque é o *Ranking Connected Smart Cities* [14], que é produzido pela empresa brasileira *Urban Systems*. Este teve sua primeira edição lançada em 2015, e classifica 100 municípios do Brasil com mais de 50 mil habitantes em 11 dimensões.

O relatório, na edição mais recente, posiciona as cidades brasileiras citadas anteriormente na dimensão de meio ambiente nas seguintes posições: Curitiba em 10ª, seguido por Belo Horizonte em 15ª, Rio de Janeiro em 33ª, Salvador em 40ª, São Paulo em 48ª e Brasília em 79ª.

No entanto, ao comparar a posição das seis cidades brasileiras que estão presentes no *ranking IESE Cities In Motion* com a colocação delas no relatório *Connected Smart Cities*, observa-se que essas cidades apresentam bons resultados no relatório nacional, porém, quando comparadas a outras cidades do mundo, não estão em colocações significativas. Esses dados evidenciam uma possível necessidade de investimento em novas ideias e projetos com o intuito de melhorar a qualidade de vida dos cidadãos e transformar as cidades em espaços mais inteligentes, tecnológicos e sustentáveis.

Em virtude disso, o presente estudo se justifica academicamente por ampliar o debate sobre educação sustentável no contexto das cidades inteligentes ao mesmo tempo que contribui na disseminação de conhecimento científico sobre iniciativas desenvolvidas na

Dimensão de meio ambiente e se há presença de ações voltadas à preservação dos oceanos em outras dimensões, a partir da análise das ações do ranking IESE *Cities In Motion* visando o desenvolvimento tecnológico e sustentável dos municípios. Dessa forma, essas práticas servirão de referência para outras comunidades que visam se tornar uma *smart city*. Diante disso, surgiram-se as seguintes hipóteses, como possíveis soluções para o problema da pesquisa:

- H1 - A dimensão de meio ambiente das cidades inteligentes contempla ações voltadas à preservação dos ecossistemas marinhos.
- H2 - Projetos urbanos na dimensão de meio ambiente dialogam de forma indireta para a preservação dos oceanos, geram impactos positivos para a sustentabilidade. O objetivo principal da pesquisa é analisar em que medida a dimensão ambiental das *smart cities* contempla iniciativas ligadas à preservação oceânica e como essas ações servirão de referência para o desenvolvimento tecnológico e sustentável dos municípios.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Gil [15], pode-se definir a pesquisa como o processo de desenvolvimento científico que tem o objetivo de descobrir respostas para problemas utilizando o emprego de métodos científicos. Assim, as pesquisas são classificadas quanto à natureza, objetivos, abordagem, procedimentos e instrumentos que serão utilizados.

Quanto à natureza, esta pesquisa se classifica como básica, visto que junta estudos com o objetivo de completar uma lacuna no conhecimento [15]. Em relação aos objetivos adotou um caráter descritivo, que é utilizado quando se pretende identificar informações sobre características de um determinado problema ou questão [16].

Quanto à abordagem, o estudo adotou um perfil qualitativo, visto que, examinará subjetivamente percepções para obter entendimento de atividades sociais e humanas [16]. No que se refere aos procedimentos, foram utilizadas a pesquisa bibliográfica, documental e a análise documental. Isso porque, todo projeto teve como referência os dados coletados na unidade de análise definida (Ranking IESE Cities In Motion e Connected Smart Cities).

2.2 ETAPAS DA PESQUISA

I - Levantamento bibliográfico: foi realizado um levantamento bibliográfico por meio de livros e artigos científicos, situados em base de dados como Google Acadêmico, SciELO, periódico CAPES e outras fontes relevantes, a fim de fundamentar a pesquisa e se aprofundar sobre aspectos relacionados à educação oceânica, comunicação científica e cidades inteligentes.

II - Estudo do relatório: após a etapa anterior, foi feita uma análise do relatório da Universidade de Negócios de Navarra, *IESE Cities in Motion (2025)*, publicado em 2025, produzido por Pascual Berrone e Joan Enric Ricart. Esse relatório possui indicadores formulados com base em dados disponibilizados por portais institucionais e governamentais, no qual, ranquearam 183 cidades do mundo em 9 dimensões. Além disso, foi estudado o relatório *Connected Smart Cities*, que analisa municípios com mais de 50 mil habitantes em 11 dimensões. O estudo se aprofundou mais na dimensão de meio ambiente, por ter uma ligação com sustentabilidade e a preservação dos ecossistemas.

III - Identificação das ações de meio ambiente: a partir da etapa anterior foi realizado uma busca das ações que visam preservar os oceanos por meio dos indicadores das dimensões do ranking IESE *Cities In Motion* e do *Connected Smart Cities*. Esses dados incluirão projetos e programas relacionados à temática de cidades inteligentes. Esta etapa permitiu mapear iniciativas, políticas e projetos que contribuem para a sustentabilidade urbana e a educação científica em comunidades.

IV - Análise e revisão de dados: foi feita uma análise/organização/revisão dos dados coletados com a identificação das ações voltadas à preservação dos oceanos para organizar as informações coletadas e iniciar a produção de um artigo científico.

V - Finalização da proposta: nesta etapa foi finalizado um artigo científico sobre o conteúdo a fim de ampliar e contribuir com o debate sobre a temática estudada.

Os dados analisados foram extraídos de relatórios públicos (IESE *Cities In Motion* e *Connected Smart Cities*) e pesquisa científica acessível. Caso os dados das análises sejam solicitados, estes podem ser disponibilizados mediante contato com os autores.

3. RESULTS

3.1 Indicadores de meio ambiente

São propostos no Ranking IESE *Cities In Motion* 11 indicadores para análise das cidades na dimensão de meio ambiente, sendo representados no **Quadro I**.

Tabela I - Indicadores da dimensão de meio ambiente do relatório IESE Cities In Motion

INDICADORES	FONTE
Emissão de CO ₂	World Bank
Emissão de metano	World Bank
Índice de Desempenho Ambiental	Universidade de Yale
Índice de emissões de CO ₂	Numbeo
Índice de poluição	Numbeo
PM	Global Residence Index
PM	IQAir
Porcentagem da população com acesso ao abastecimento de água	World Bank
Resíduos sólidos	Waste Management for Everyone
Vulnerabilidade climática	National Geographic
Recursos hídricos renováveis	FAO

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

A partir da análise dos indicadores de meio ambiente extraídos do relatório IESE Cities In Motion, pode-se notar que não existe um indicador específico voltado para a área da preservação dos oceanos. Entretanto, os indicadores apresentados contribuem indiretamente impactando com os ecossistemas marinhos. A redução das emissões de CO₂ e do gás metano, impactam diretamente no aquecimento global e acidificação dos oceanos, o índice de desempenho ambiental garante o uso sustentável dos recursos humanos, o índice de poluição, pode gerar impacto para os oceanos, ao depositar gases que afetam as vidas marinhas, o índice de pessoas com acesso à água potável diminuem a contaminação de mananciais que muitas vezes tem ligação com as bacias hidrográficas que desaguam no mar, o índice de resíduos sólidos urbanos gerados por pessoa contribui para a diminuição de lixo que chega até os oceanos, preservando a vida marinha.

Além disso, foram analisados os indicadores de meio ambiente do ranking nacional Connected Smart Cities, que possui 14 indicadores, como mostra o **Quadro II**.

Tabela II - Indicadores da dimensão de meio ambiente do relatório Connected Smart Cities

INDICADORES %	FONTE
Atendimento urbano de água	SNIS
Perdas na distribuição de água	SNIS
Atendimento urbano de esgoto	SNIS
Tratamento de esgoto	SNIS
Recuperação de materiais recicláveis	SNIS
Cobertura de coleta de resíduos sólidos	SNIS
Monitoramento de área de riscos	Cemaden
Resíduos plásticos recicláveis	Snis/Urban Systems
Idade média da frota de veículos	Senatran
Outros modais de transporte(massa)	Pesquisa Urban Systems
Veículos de baixa emissão	Senatran
Potência outorgada energia UFV	Aneel
Potência outorgada energia eólica	Aneel
Potência outorgada biomassa	Aneel

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Com base na análise dos indicadores do relatório Connected Smart Cities, é possível notar que não há presença de um indicador específico para a preservação dos ecossistemas marinhos. Entretanto, os indicadores presentes dialogam indiretamente para esse objetivo. Um exemplo é a porcentagem de resíduos plásticos recicláveis e a recuperação de materiais recicláveis, tais índices contribuem para mitigar resíduos sólidos que muitas vezes param nos mares e rios, afetando a preservação da fauna e da flora marinha.

Além disso, alguns indicadores que não estão relacionados à dimensão de meio ambiente, mas sim à de mobilidade urbana, é a idade média de frota de veículos, o percentual de automóveis de baixa emissão e a utilização de outros modais de transporte. Esses fatores reduzem as emissões de gases poluentes na atmosfera, contribuindo assim para o enfrentamento do aquecimento global, que gera efeitos diretos para os oceanos devido ao aumento da temperatura do mar.

Por fim, o indicador responsável pelo monitoramento de áreas de riscos, embora seja mais voltado para a dimensão de planejamento urbano, desempenha um papel fundamental ao colaborar para o planejamento de cidades menos vulneráveis a desastres ambientais, evitando que os resíduos cheguem até os corpos hídricos e gerem impactos a vida marinha.

4. DISCUSSION

Portanto, pode-se concluir que a ausência de indicadores voltados para a questão dos oceanos revela a necessidade de mais investimentos nesse setor, pois apesar dos índices apresentados terem uma ligação com a conservação oceânica, é inexistente a presença de um indicador realmente focado nesta área. Tal resultado vai de acordo com a hipótese 1 que também foi comprovada em um estudo de Mcruer [17], que diz que há uma necessidade de desenvolver indicadores e métricas focados na cultura oceânica. Além disso, a hipótese 2 também é comprovada ao perceber que por mais que os índices da dimensão de meio ambiente não avaliem a questão dos oceanos, eles contribuem de forma indireta na diminuição dos impactos que poderiam causar a esses ecossistemas. Logo, o presente projeto constata a necessidade da elaboração de novos índices voltados especificamente para a esfera de defesa dos mares, a fim de gerar desenvolvimento sustentável dos municípios, tendo em vista o período de Década dos Oceanos que estamos inseridos, este que segundo a Unesco [18] tem o objetivo de apoiar esforços para reverter o ciclo de declínio na saúde dos oceanos.

REFERENCES

1. Oliveira, A.J.C. Urbanização e os problemas relacionados com o saneamento básico e meio ambiente nas cidades. *Períód. Téc. Cient. Cid. Verdes* **2021**, 9, 1–11. DOI: 10.17271/2317860492320212930.
2. Abirami, B.; et al. Impacts of global warming on marine microbial communities. *Science of The Total Environment*, **2021**, 791, 147905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147905>
3. Organização Meteorológica Mundial – OMM. OMM confirma 2024 como o ano mais quente já registrado, cerca de 1,55 °C acima do nível pré-industrial. *World Meteorological Organization*, 2025. Disponível em: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155de-gc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: 25 ago. 2025.
4. Organização das Nações Unidas – ONU. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil. 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 20 jun. 2024.
5. Meira, L. C. R.; Pires, D. F. *Smart cities e o crescimento demográfico: levantamento teórico com foco no ODS 11*. 2023.
6. Ronchi, C.; Carozzo-Todaro, M.; Coelho, R. Cidades inteligentes, pessoas inteligentes e desinformação. *Revista de Ciências da Administração*, **2023**, 25(65), 1–13.
7. Zhu, D.; Jia, Z.; Zhou, Z. Place attachment in the ex-situ poverty alleviation relocation: Evidence from different poverty alleviation migrant communities in Guizhou Province, China. *Sustainable Cities and Society*, **2021**, 75, 103355. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103355>
8. Mendes, T. C. M. *Smart cities: solução para as cidades ou aprofundamento das desigualdades sociais*. Texto para Discussão, **2020**, 11.
9. Giffinger, R.; et al. *Smart Cities: Ranking of European medium-sized cities*. Final Report. 2007. Disponível em: https://www.smart-cities.eu/download/smart_cities_final_report.pdf. Acesso em: 22 ago. 2025.
10. Rosas, S. V.; et al. Smart cities of the future: An interdisciplinary literature review. Dimensions and proposed characteristics. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.00900>. Acesso em: 25 ago. 2025.
11. Ferreira, A. S.; et al. Cidades inteligentes e meio ambiente: uma análise cienciométrica. 2023. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/RevistaLetras/article/view/8916>. Acesso em: 21 ago. 2025.
12. Russell, Jane M. Scientific communication at the beginning of the twenty-first century. *International Social Science Journal*, v. 53, n. 168, 2001.
13. Berrone, P.; Ricart, J. E. *IESE Cities in Motion Index 2024*. IESE Business School University of Navarra, **2024**, v. 1, p. 8–23.
14. Urban Systems. *Ranking Connected Smart Cities 2024*. Governo do Paraná. 2024. Disponível em: https://portal.crea-sc.org.br/wp-content/uploads/2024/09/Relatorio_Ranking_CSC_2024_p_df. Acesso em: 16 jun. 2024.
15. Gil, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
16. Collis, J.; Hussey, R. *Pesquisa em administração: um guia prático para alunos de graduação e pós-graduação*. Porto Alegre: Bookman, 2005.
17. MCRUER, Jen et al. Ocean literacy research community: co-identifying gaps and priorities to advance the UN Ocean Decade. *Frontiers in Marine Science*, v. 11, p. 1469451, 2024.
18. Unesco. United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021–2030). *UNESCO*. 2025. Disponível em: <https://www.unesco.org/en/decades/ocean-decade>.

Oceano em Perigo, a invasão microplástica: Jogo Interdisciplinar para a Educação Ambiental no Ensino Médio

Ever Santos ¹, Júlio César ², Vanessa Kalliny ³, Amanda Oliveira ⁴, Jordana Oliveira ⁵

¹ Instituto Federal De Alagoas; egs26@aluno.ifal.edu.br

² Instituto Federal De Alagoas; jcrs4@aluno.ifal.edu.br

³ Instituto Federal De Alagoas; s13@aluno.ifal.edu.br

⁴ Instituto Federal De Alagoas; aso23@aluno.ifal.edu.br

⁵ Instituto Federal De Alagoas; jordana.oliveira.ifal.edu.br

Abstract: The Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021–2030), proclaimed by the UN, reinforces the urgency of understanding, preserving, and restoring marine ecosystems in the face of growing anthropogenic threats. Among these, microplastic pollution stands out, as it compromises the health of the seas and biodiversity, establishing itself as one of the greatest contemporary environmental challenges. Microplastic pollution today constitutes one of the most concerning issues of the 21st century, as it combines invisibility with strong persistence in marine environments. In this context, schools play a strategic role in promoting critical, innovative, and challenging pedagogical practices. Within this perspective, the project “Ocean in Danger: The Microplastic Invasion” was created, a digital board game developed on the Genially platform and aimed at high school students. The proposal simulates decision-making situations related to the consumption and disposal of plastics, encouraging reflection on the ecological, social, and economic impacts resulting from marine pollution. Its implementation, to be carried out at the Federal Institute of Alagoas – Campus Benedito Bentes, seeks to stimulate engagement, strengthen scientific literacy, and broaden socio-environmental competencies through interdisciplinarity between Biology, Chemistry, Geography, and Economics. With the support of digital gamification and environmental education, the experience is expected to contribute positively to the development of more critical and conscious students, in line with the Sustainable Development Goals (SDG 4, SDG 6, SDG 11, SDG 12, and SDG 14) and with the principles of the Decade of Ocean Science.

Keywords: microplastics; digital gamification; sustainability; high school; environmental education.

1. INTRODUÇÃO

A Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021–2030), proclamada pela ONU, representa um marco global para a preservação dos mares e para o fortalecimento de práticas que assegurem a integridade dos ecossistemas marinhos. Esses ambientes, essenciais para o equilíbrio do planeta, abrigam uma imensa biodiversidade, regulam o clima e sustentam atividades humanas fundamentais, como a pesca e o turismo. No entanto, enfrentam pressões crescentes decorrentes de ações antrópicas, entre as quais se destacam a poluição química, a sobrepesca e, de forma cada vez mais evidente, a contaminação por microplásticos.

O problema dos microplásticos, em especial, revela-se como um desafio crítico para a sustentabilidade dos oceanos, configurando-se como uma preocupação ambiental crescente neste século. Invisíveis a olho nu, essas partículas plásticas se acumulam em ecossistemas marinhos, comprometendo cadeias alimentares, organismos vivos e, consequentemente, a saúde humana. Como destacam Zhang e Li (2023, p. 214), “os microplásticos não apenas afetam a

fisiologia dos organismos marinhos, mas também entram na cadeia alimentar humana, representando uma ameaça silenciosa e persistente”. Tal constatação evidencia que a problemática ultrapassa a esfera ecológica, alcançando dimensões sociais e sanitárias que precisam ser incorporadas ao âmbito educacional.

Diante desse cenário, a escola assume papel central na formação de sujeitos capazes de compreender a complexidade da crise ambiental atual. Moran (2023, p. 45) enfatiza que “a aprendizagem só faz sentido quando o estudante se reconhece como protagonista do processo, enfrentando dilemas reais que exigem escolhas responsáveis”. Essa perspectiva dialoga diretamente com a necessidade de inserir metodologias que promovam engajamento, criticidade e corresponsabilidade desses sujeitos.

Nesse sentido, a gamificação se consolida como recurso inovador para o ensino de ciências, ao transformar conteúdos abstratos em experiências concretas e participativas. Hamari *et al.* (2020, p. 72) observam que “a mecânica dos jogos, quando transposta para o campo educacional, tem o potencial de intensificar a motivação intrínseca dos alunos, promovendo maior persistência e envolvimento com as tarefas propostas”. Com base nessa concepção, “Oceano em Perigo: a invasão microplástica” surge como proposta pedagógica interdisciplinar, articulando Biologia, Química, Geografia e Economia, e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente ODS 4 (Educação de Qualidade), ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 14 (Vida na Água), assim como aos princípios da Década da Ciência Oceânica (2021- 2030).

A proposta do jogo fundamenta-se na teoria do Flow, de Mihaly Csikszentmihalyi, segundo a qual experiências educativas se tornam profundamente envolventes quando o nível de desafio está equilibrado com a habilidade do participante, promovendo engajamento contínuo e foco sustentado (Csikszentmihalyi & Csikszentmihalyi, 1992). Nesse contexto, a experiência de aprendizagem é organizada a partir de quatro pilares fundamentais: meta, que estabelece o propósito do jogador; objetivo, definido pelas tarefas e conquistas a serem alcançadas; dinâmica, que descreve as interações entre regras, desafios e comportamentos; e elementos, englobando recursos visuais, feedbacks, recompensas e narrativas que tornam a experiência concreta e motivadora. Essa estrutura permite que conteúdos complexos sejam assimilados de forma lúdica, favorecendo o desenvolvimento de competências críticas e a percepção do impacto das ações humanas sobre os ecossistemas marinhos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa, alinhada à proposta de inserir práticas pedagógicas inovadoras para o enfrentamento da poluição por microplásticos, caracteriza-se como de natureza descritiva e interventiva, fundamentada na abordagem da pesquisa-ação (Benbasat, Goldstein & Mead, 1987). Nesse contexto, foi elaborado o jogo “Oceano em Perigo: A invasão microplástica”, desenvolvido na plataforma Genially, em formato de tabuleiro digital interativo (figura 1).



Figura 1 - Capa introdutória do jogo. Fonte : os autores (2025).

Os estudantes, organizados em grupos de cinco, assumem o papel de gestores ambientais. Ao longo das rodadas, recebem “cartas-desafio” que apresentam problemas reais, tais como: descarte inadequado de plásticos, contaminação de cadeias tróficas por microplásticos, impacto econômico da pesca comprometida e necessidade de políticas públicas de redução de resíduos. As decisões tomadas influenciam diretamente dois indicadores principais: a saúde da biodiversidade marinha e os recursos financeiros comunitários (figura 2).

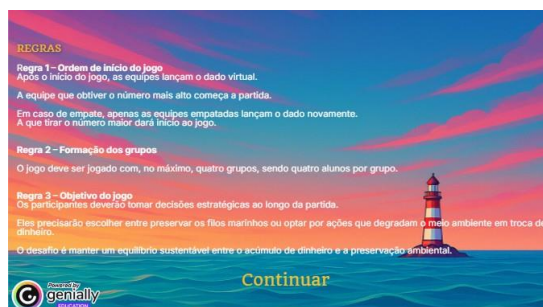


Figura 2 -Layout com as Regras do jogo. Fonte: os autores (2025).

O jogo é estruturado em rodadas que equivalem a ciclos de gestão ambiental. Ao final, a equipe vencedora é aquela que conseguir manter ao menos 80% da biodiversidade preservada e equilíbrio econômico nos recursos disponíveis.



Figura 3 -Tabuleiro interativo do jogo. Fonte: os autores (2025).

A avaliação pedagógica será conduzida em duas etapas complementares: (i) questionários pré e pós-atividade, para mensurar mudanças de percepção, e (ii) rodas de conversa, que permitirão captar interpretações qualitativas. Além disso, aspectos relacionados à experiência de Flow, como engajamento, concentração e equilíbrio entre desafio e habilidade, serão observados e discutidos durante as atividades, a fim de verificar se o jogo promove estados de imersão e motivação intrínseca nos participantes (Csikszentmihalyi & Csikszentmihalyi, 1992). A análise quantitativa usará o teste t pareado no software R, e os dados qualitativos serão submetidos à análise de conteúdo (Bardin, 2011).

3. RESULTADOS

Espera-se que os questionários pré-teste revelem níveis iniciais variados de conhecimento e percepção dos estudantes sobre microplásticos, suas consequências ambientais e práticas de conservação, evidenciando lacunas no entendimento de relações ecológicas, sociais e econômicas do fenômeno.

Já os questionários pós-teste devem indicar melhoria significativa na compreensão dos conteúdos abordados, refletida em respostas mais completas sobre impactos da poluição por microplásticos, ações de mitigação e corresponsabilidade ambiental. Espera-se também aumento da consciência crítica sobre o consumo cotidiano, descarte inadequado e suas repercussões nos ecossistemas marinhos.

Além disso, a aplicação do jogo deve gerar engajamento elevado, motivação intrínseca e experiências de imersão (Flow), observáveis pelo envolvimento ativo dos alunos durante

as tarefas, resolução de desafios e tomada de decisão dentro do jogo. A estrutura baseada nos quatro pilares — meta, objetivo, dinâmica e elementos — é projetada para favorecer a assimilação interdisciplinar de Biologia, Química, Geografia e Economia e o desenvolvimento de competências do século XXI, como pensamento crítico, colaboração e criatividade.

Como parte do PIBID Interdisciplinar do IFAL, o jogo será lançado em um e-book e disponibilizado gratuitamente, permitindo sua aplicação em outras escolas e ampliando o alcance educacional. Além de ficar disponível na plataforma Genially. Esses resultados esperados indicam o potencial do jogo como ferramenta pedagógica inovadora para promover aprendizagem significativa e conscientização ambiental.

4. DISCUSSÃO

A aplicação do jogo “Oceano em Perigo: A invasão microplástica”, em uma perspectiva interdisciplinar, apresenta-se como uma estratégia inovadora e altamente relevante para o contexto educacional contemporâneo. Ao incorporar elementos lúdicos e mecânicas de jogos, busca-se promover maior engajamento discente, estimulando não apenas a participação ativa dos estudantes, mas também o desenvolvimento de uma consciência crítica acerca das relações entre consumo cotidiano, descarte inadequado e impactos ambientais. Como aponta Landers (2014), a gamificação cria um ambiente de aprendizagem mais atrativo, capaz de estimular a motivação e a permanência dos alunos no processo educativo.

Quando articulada de modo interdisciplinar, a proposta amplia ainda mais seu potencial formativo, uma vez que integra saberes da Biologia, Química, Geografia e Economia em um todo coeso, possibilitando uma compreensão mais abrangente e contextualizada do fenômeno dos microplásticos. Nesse sentido, a gamificação favorece não apenas a assimilação dos conceitos específicos de cada disciplina, mas também o reconhecimento da complexidade ambiental e social envolvida, conduzindo os estudantes a uma aprendizagem mais significativa. Como ressalta Kapp (2012), os jogos educacionais encorajam a exploração de conexões entre conteúdos distintos, fortalecendo uma compreensão mais holística e aplicada.

Além disso, tal abordagem contribui para o desenvolvimento de habilidades essenciais ao século XXI, como o pensamento crítico, a colaboração e a capacidade de resolver problemas de forma criativa. De acordo com Garone (2021), a gamificação promove situações de tomada de decisão e resolução de desafios que fortalecem competências valorizadas no mundo contemporâneo, em especial aquelas relacionadas à cooperação e à análise crítica. Ao serem desafiados a elaborar estratégias dentro do jogo, os alunos exercitam competências que extrapolam o ambiente escolar, preparando-os de maneira mais sólida para enfrentar os desafios globais relacionados à sustentabilidade e à preservação ambiental. Cabe destacar, entretanto, que a implementação de práticas gamificadas requer planejamento criterioso e alinhamento com os objetivos pedagógicos, de modo a evitar que se reduzam a experiências meramente recreativas. Nesse sentido, torna-se fundamental garantir o equilíbrio entre a dimensão lúdica e o rigor acadêmico, assegurando que o aprendizado se mantenha no centro do processo.

Diante dos objetivos propostos, ressalta-se que a investigação sobre a aplicação eficaz da gamificação no ensino interdisciplinar dos microplásticos configura-se como uma contribuição significativa para o campo educacional. Ao buscar unir engajamento, criticidade e interdisciplinaridade, pretende-se não apenas enriquecer a experiência formativa dos estudantes, mas também prepará-los para atuar como cidadãos conscientes e protagonistas de mudanças em direção a um futuro mais sustentável.

Adicionalmente, a perspectiva do Flow, proposta por Csikszentmihalyi & Csikszentmihalyi (1992), reforça a relevância da gamificação no ensino, ao demonstrar que o engajamento profundo e a motivação intrínseca ocorrem quando o nível de desafio se equilibra com a habilidade do participante. Estudos recentes de Sousa et al. (2025) indicam que ambientes gamificados podem gerar experiências de aprendizado inclusivas e empáticas, mantendo desempenho consistente mesmo na presença de estereótipos ou ameaças percebidas. Esses achados sugerem que a aplicação de elementos gamificados,

quando projetados considerando diversidade e inclusão, potencializa a experiência de Flow e permite que todos os estudantes participem ativamente, desenvolvendo competências cognitivas e socioemocionais de forma equitativa. Dessa forma, a integração de princípios de design inclusivo e experiências envolventes em jogos educativos amplia o impacto pedagógico da aprendizagem interdisciplinar sobre microplásticos.

5. CONCLUSÃO

O jogo “Oceano em Perigo: A invasão microplástica” apresenta-se como uma ferramenta pedagógica inovadora para a Educação Ambiental no Ensino Médio, com potencial para promover aprendizagem significativa, engajamento ativo e desenvolvimento de consciência crítica sobre microplásticos e seus impactos ambientais. A estrutura baseada em meta, objetivo, dinâmica e elementos, aliada à perspectiva do Flow, favorece experiências de imersão e motivação intrínseca, estimulando competências do século XXI, como pensamento crítico, colaboração e criatividade.

Além disso, a incorporação de princípios de diversidade e inclusão indica que ambientes gamificados podem oferecer experiências de aprendizagem equitativas, garantindo participação ativa de todos os estudantes. A disponibilização do jogo em e-book e na plataforma Genially, de forma gratuita, amplia seu alcance e possibilita a aplicação em outras escolas, contribuindo para a disseminação de práticas educacionais inovadoras.

Dessa forma, a proposta combina aprendizagem interdisciplinar, engajamento lúdico e responsabilidade socioambiental, fortalecendo o papel da escola na formação de cidadãos conscientes e preparados para enfrentar desafios globais relacionados à sustentabilidade e à preservação dos ecossistemas marinhos.

REFERÊNCIAS

1. Zhang, Y.; Li, X. Gamified Education for Plastic Pollution Awareness. *Environmental Education Research* **2023**, *29*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/13504622.2023.2178857>.
2. Moran, J.M. Metodologias Ativas e Protagonismo Discente. In Bacich, L.; Moran, J.M. (Orgs.); Penso: Porto Alegre, Brasil, 2023.
3. Hamari, J.; Koivisto, J.; Sarsa, H. Gamification and Motivation. *Computers in Human Behavior* **2020**, *107*, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.106174>.
4. Csikszentmihalyi, M.; Csikszentmihalyi, I.S. *Optimal Experience: Psychological Studies of Flow in Consciousness*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1992.
5. Benbasat, I.; Goldstein, D.K.; Mead, M. The Case Research Strategy in Studies of Information Systems. *MIS Quarterly* **1987**, *11*(3), 369–386. <https://doi.org/10.2307/248684>.
6. Bardin, L. *Análise de Conteúdo*; Edições 70: Lisboa, Portugal, 2011.
7. Landers, R.N. Gamification in Education: What, How, Why Bother? *Academic Exchange Quarterly* **2014**, *18*(2), 1–5.
8. Kapp, K.M. *The Gamification of Learning and Instruction: Game-Based Methods and Strategies for Training and Education*; Pfeiffer: San Francisco, CA, USA, 2012.
9. Garone, D. *Gamificação na Educação: Estratégias e Aplicações*; Editora Educacional: São Paulo, Brasil, 2021.
10. Sousa, B.F. de; Chalco Chalco, G.; Reis, M.; Barbosa, J.F.S.; Martins, F.R. do N.; Isotani, S.; Santana, I.I.B. Flow Experience, Performance Expectation and Performance: An LGBTQ+ Diversity Perspective on Gamified Systems. *Revista Brasileira de Informática na Educação* **2025**, *33*, 197–215. <https://doi.org/10.5753/rbie.2025.4474>.
11. Ouariachi Peralta, T.; Olvera-Lobo, M.D.; Gutiérrez-Pérez, J.; de Maeyer, P. Gamification Approaches for Environmental Education. *Sustainability* **2020**, *12*(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su12020507>.
12. Deterding, S. Serious Games and Learning. *Journal of Computer Assisted Learning* **2021**, *37*, 938–950. <https://doi.org/10.1111/jcal.12504>.
13. Kishimoto, T.M. *Jogo, Brinquedo, Brincadeira e a Educação*; Cortez: São Paulo, Brasil, 2010.
14. Loureiro, C.F.B. Perspectivas da Educação Ambiental Crítica. *Educação e Sociedade* **2006**, *27*(96), 389–404. <https://doi.org/10.1590/S0101-73302006000200006>.
15. Moran, J.M. *Mudando a Educação com Metodologias Ativas*; Penso: Porto Alegre, Brasil, 2015.
16. Oliveira, A.; Sichieri, T. Gamificação e Aprendizagem. *Revista Educação e Inovação* **2024**, *4*(2), 1–15.
17. Sociedade Científica. *Gamificação e Desafios da Educação Pública: Relatório Técnico*; Sociedade Científica: São Paulo, Brasil, 2024.

18. Vygotsky, L.S. *A Formação Social da Mente*; Martins Fontes: São Paulo, Brasil, 1998.
19. 2nd International Workshop on Plastic Pollution in the Oceans. Available online: <https://www.iwppo.com/en> (accessed on 20 August 2025).

Educação Ambiental Gamificada Para Reciclagem – Impactos E Avaliação De Engajamento E Performance Em Estudantes

Kleber Silva¹ Marseille Evelyn Lessa de Santana²

¹ Programa de Pós-Graduação em Análise de Sistemas Ambientais - CESMAC; wavai7@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Análise de Sistemas Ambientais - CESMAC; marseillelessa@hotmail.com

* Correspondência: wavai7@gmail.com;

Resumo: A preocupação ambiental tem crescido com o aumento exponencial do lixo mundial, destacando o desafio local em Maceió. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um jogo de tabuleiro como ferramenta de gamificação para engajar a nova geração na conscientização sobre resíduos sólidos. O projeto utiliza o design de jogos para criar uma experiência interativa e educativa. A metodologia envolve playtesting e a coleta de dados por questionários para avaliar a percepção dos jogadores e a aquisição de conhecimento. Espera-se validar o potencial dos jogos como instrumentos pedagógicos eficazes para informar e motivar ações sustentáveis.

Palavras-Chave: Gamificação, Educação ambiental, jogo de tabuleiro

1. INTRODUÇÃO

A preocupação em relação a degradação do meio ambiente tem crescido exponencialmente, apresentando um reflexo nos temas de pesquisas recentes sobre educação ambiental e sustentabilidade [1, 2].

Anualmente estima-se que sejam produzidos 2,1 bilhões de toneladas de lixo mundialmente, e predições indicam que esse número deve crescer aproximadamente 80% entre 2020 e 2050, chegando a casa dos 3,8 bilhões de toneladas ao ano. De tudo o que é produzido, 38% dos resíduos são descartados incorretamente. Na América do Sul, esse percentual é de 34% segundo dados do relatório do Global Waste Management Outlook 2024 [3].

No Brasil, cerca de 77,1 milhões de toneladas de lixo são produzidas todo ano, o que se traduz em 211 mil toneladas de resíduos gerados por dia, indicando que cerca de 380kg de lixo foi produzido por pessoa em 2023 (ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente). Em Alagoas, segundo dados de 2019 do SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, a quantidade de resíduos produzidos pelas cidades no mesmo período foi de 591.173 toneladas, com a capital Maceió contribuindo com cerca de 60% desse total [4, 5].

Diante de tamanho desafio, se faz necessário um instrumento revestido de um caráter inovador que possa dialogar com as atuais gerações quanto a importância de contribuir com um futuro mais sustentável [6]. Um dos instrumentos tecnológicos frequentemente aplicados para fins educacionais são os jogos para motivar os alunos e aumentar o engajamento. Acredita-se que a motivação inerente trazida pelos elementos e pela estética dos jogos (também conhecida como gamificação) pode ser vantajosa em contextos educacionais [6-10]. Estudos de gamificação apresentaram evidências de vantagens em seu uso, como compatibilidade com métodos e teorias científicas, suporte ao pensamento científico e conformidade com estratégias de ensino [11, 12].

A gamificação é conceituada como o processo de utilizar recursos e mecanismos dos games para envolver e motivar pessoas, promover a aprendizagem e resolver problemas. Um conteúdo gamificado, assim como um jogo digital em uma sala de aula sempre motivam as crianças e jovens, pois é constituído de vários elementos que se complementam aliando desafio, curiosidade e fantasia, aspectos que deveriam estar presentes dentro das escolas [7, 13-15] LEE; HAMMER, 2011 [16, 17].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Participarão deste estudo estudantes do ensino fundamental e médio, da Escola Estadual Alfredo Gaspar de Mendonça, que serão recrutados preferencialmente do 9º Ano do ensino fundamental ao ensino médio. A administração da escola será contactada previamente e serão organizadas reuniões para explicar o desenho amostral, planos e objetivos da investigação. Chegando a um acordo com os responsáveis pela gestão da escola, a participação dos alunos no experimento será condicionada à concordância com o termo de consentimento livre e esclarecido e com autorização do responsável legal, no caso de alunos menores de idade. Além disso, cabe destacar que não serão oferecidas recompensas acadêmicas e/ou financeiras pela participação no experimento. A intervenção será aplicada com grupos controle e experimental simultaneamente, e os alunos serão selecionados de forma aleatória para fazer parte dos grupos e um número mínimo de 30 participantes em cada grupo.

Dois questionários adaptados e validados para o português brasileiro serão utilizados para estimar o engajamento por meio do estado de fluxo: (1) o DFS-2, ou Escala de Disposição ao Estado de Fluxo, usado como pré-teste do Estado de Fluxo e (2) o FSS-2, ou seja, Escala de Estado de Fluxo-2. Estas são ferramentas de medição de diálogo de autorrelato, sendo a primeira projetada para medir a tendência e disposição de um indivíduo para experimentar o estado de fluxo, e a última é usada para avaliar a experiência subjetiva do estado de fluxo de um indivíduo durante uma atividade ou tarefa específica. Ambos os questionários são construídos com 9 perguntas com respostas em escala Likert de 5 pontos que variam de “nunca” ou pontuação 1, até “muito frequentemente” com pontuação 5 [18].

Entretanto, o desempenho em atividades de comportamento pró-ambiental (CPA) de reciclagem será estimado por meio de um exame com 15 questões em dois grupos: um que participará de uma atividade gamificada (grupo experimental) e um que participará de uma palestra (grupo controle). Cada resposta correta no exame acrescentará um ponto à pontuação e as respostas erradas não acarretarão qualquer tipo de penalidade na pontuação, permitindo comparações e avaliação de desempenho com base apenas nos pontos obtidos e seguindo os parâmetros descritos na literatura [2]. Os participantes também serão convidados a responder a um questionário socioeconômico sobre etnia, gênero, cidade de residência e nível de escolaridade. O estudo será conduzido com um design de um fator, o comportamento de pró-ambiental associado à reciclagem, e as duas condições de (1) palestra e (2) gamificada (Figura 1).

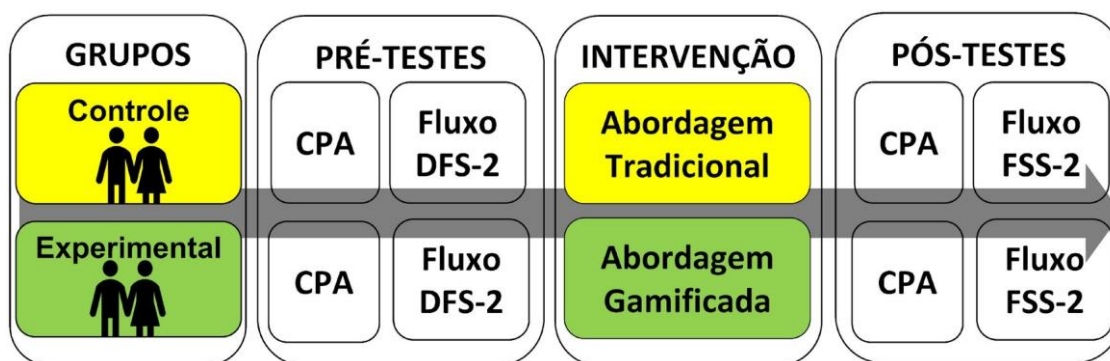


Figura 1. Design experimental dos pré-testes e pós-testes de fluxo e comportamento ambiental nas abordagens tradicionais (palestras, grupo controle) e abordagem gamificada (grupo experimental).

3. RESULTADOS

O jogo de tabuleiro já tem uma estrutura formada com 50 casas, por onde até 4 jogadores percorrem até o fim e neste percurso entram em contato com pinos que representam sacos de lixo que eles devem dar o direcionamento correto ao longo da jornada. O jogo visa estimular o jogador a dar o melhor direcionamento possível aos materiais descartados, seja jogando no lugar correto (lata do lixo) seja vendendo nos pontos de reciclagem, gerando a ideia de lucro a partir daquilo que seria descartado. O dado é o elemento que permite o avanço dos jogadores pelo meio do tabuleiro. Entre os recursos estão 32 cartas que se dividem entre cartas de perguntas, cartas de bons exemplos e de maus exemplos. 60 representações de notas de dinheiro servem como recurso financeiro dentro do jogo no momento em que o jogador vai se desfazer do lixo e com esse dinheiro ele pode trocar por cartas que facilitarão o jogador a chegar ao fim, a vitória. Dia 22 de julho apresentei uma palestra sobre Gamificação na escola Alfredo Gaspar de Mendonça, no grupo do Pibic Jr. formado por alunos do 1º e 2º anos do ensino médio. Este grupo do Pibic visa a fazer jogos educativos para o ensino dos descritores do português à alunos que estão terminando o fundamental 2, para a prova SAEB (Sistema de avaliação da Educação Básica). A palestra foi baseada nas leituras e no desenvolvimento do trabalho. No mesmo grupo será feito em breve um play teste com o intuito de verificar a percepção dos mesmos quanto ao jogo, de modo a aprimorar as regras e ver o grau de engajamento que o jogo pode criar. Um questionário com 15 perguntas entre abertas e fechadas dará uma visão do grau de desenvolvimento do jogo, o que está bom e o que precisa ainda ser melhorado. Este feedback será muito importante para correção de rotas quanto ao que o jogo poderá tomar, aprimorando a jogabilidade e tornando o mesmo mais interessante, permitindo que eles fiquem mais interessados quanto a questão da educação ambiental.

Uma vez finalizado o jogo, o trabalho irá para a fase 2 em que será aplicado em sala de aula. Haverá dois grupos sendo no primeiro ministrado uma palestra sobre educação ambiental e no segundo aplicado o jogo. Haverá dois testes, um aplicado antes da apresentação da palestra e da aplicação do jogo e outro teste depois da palestra e da aplicação do jogo. O pré teste e o pós teste visam a demonstrar a viabilidade do jogo como recurso educativo em face da palestra para educação ambiental. A comparação do resultado do pré teste e pós teste do jogo, do pré teste e pós teste da palestra e o pós teste entre o jogo e a palestra. Com isto esperamos que o resultado do jogo seja melhor em todos os testes comparativos.

Com o pleno desenvolvimento do jogo espero que ele possa gerar o gosto pela preservação ambiental, o correto direcionamento do lixo naqueles que venham a jogar. O engajamento é um elemento muito importante de mudança e isso é algo que Mihaly Csikszentmihalyi descobriu ao longo de 20 anos de pesquisa. O processo de gamificação que se dá através do jogo permitirá aos jogadores uma melhor percepção da problemática que é o descarte incorreto do lixo.

4. DISCUSSÃO

A análise dos dados parciais corrobora a hipótese inicial de que o jogo de tabuleiro pode ser uma ferramenta pedagógica eficaz para a conscientização ambiental. O alto nível de engajamento e a percepção positiva dos participantes (conforme revelado pelo questionário de feedback) indicam que a abordagem lúdica foi bem-sucedida em capturar a atenção dos jogadores. A mecânica de aquisição e descarte de lixo, em particular, transcendeu a função de uma simples regra de jogo e se tornou uma representação simbólica das consequências do descarte inadequado no mundo real. A penalidade de movimento, associada diretamente ao acúmulo de lixo, funcionou como um reforço negativo que, de maneira divertida, ensinou sobre a responsabilidade individual na gestão de resíduos.

O aumento mensurável no conhecimento dos jogadores, evidenciado pela melhora nas pontuações do quiz pós-partida, valida a capacidade do jogo de não apenas entreter, mas também educar. A memorização de conceitos como as cores da coleta seletiva e a compreensão das consequências do lixo para o meio ambiente ocorreu de forma natural e interativa, diferindo do modelo tradicional de ensino. Este resultado alinha-se com os princípios da gamificação, que defende a aprendizagem como um processo ativo e significativo.

É importante notar, contudo, que a avaliação inicial foi conduzida com um grupo limitado de participantes, o que sugere a necessidade de testes em larga escala para validar a eficácia do jogo em diferentes faixas etárias e contextos socioculturais. O feedback qualitativo destacou o potencial para aprimoramentos nos componentes artísticos e no design, o que reforça a natureza iterativa do processo de desenvolvimento.

5. CONCLUSÕES

Em suma, o projeto de criação e avaliação do jogo de tabuleiro de conscientização ambiental demonstrou ser um possível sucesso pedagógico. O jogo se estabeleceu como uma ferramenta viável e de baixo custo para a educação ambiental, com potencial para ser utilizado tanto em ambientes formais, como escolas, quanto em contextos informais, como eventos comunitários ou em família. A capacidade de traduzir temas complexos em uma experiência de jogo envolvente prova a relevância do design de jogos como uma metodologia de ensino. As perspectivas futuras para este projeto incluem a realização de um playtesting mais abrangente para uma validação estatística mais robusta dos resultados. Além disso, a busca por parcerias com instituições de ensino e organizações ambientais pode possibilitar a produção do jogo em escala maior, maximizando seu impacto social e educacional. O sucesso inicial sugere que o investimento em abordagens lúdicas para a educação ambiental é um caminho promissor e necessário para formar cidadãos mais conscientes e responsáveis.

REFERENCES

1. Veloso, G.M.B., et al., *PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS NA UFRPE: A GAMIFICAÇÃO COMO FERRAMENTA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL*. Boletim do Tempo Presente, 2019. **8**(4).
2. Albuquerque, J., et al., *Does gender stereotype threat in gamified educational environments cause anxiety? An experimental study*. Computers & Education, 2017. **115**: p. 161-170.
3. Association, I.S.W., *Global waste management outlook 2024: beyond an age of waste, turning rubbish into a resource*. 2024.
4. Araujo, L.G. and L.Q. Barbosa. *COLETA SELETIVA: A EXPERIÊNCIA DE CONTRATAÇÃO DAS COOPERATIVAS DE MACEIÓ*. in *Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais*. 2020.
5. Xavier, J.M.B., *A importância das relações públicas comunitárias para a educação ambiental: uma análise da Superintendência Municipal de Desenvolvimento Sustentável e do aparelho Ponto de Entrega Voluntária (PEV)*. 2022.
6. Fardo, M.L., *A gamificação aplicada em ambientes de aprendizagem*. Renote, 2013. **11**(1).
7. Deterding, S., et al. *From game design elements to gamefulness: defining "gamification"*. in *Proceedings of the 15th international academic MindTrek conference: Envisioning future media environments*. 2011.
8. Dicheva, D., et al., *Gamification in education: A systematic mapping study*. Journal of Educational Technology & Society, 2015. **18**(3): p. 75-88.
9. Kapp, K.M., *The gamification of learning and instruction: game-based methods and strategies for training and education*. 2012: John Wiley & Sons.

-
9. Papadakis, S. and M. Kalogiannakis, *Using gamification for supporting an introductory programming course. the case of classcraft in a secondary education classroom*, in *Interactivity, game creation, design, learning, and innovation*. 2017, Springer. p. 366-375.
 10. Morris, B., et al., *Gaming science: the "Gamification" of scientific thinking*. *Frontiers in psychology*, 2013. **4**: p. 607.
 11. Vidakis, N., et al. *in-Game Raw Data Collection and Visualization in the Context of the "ThimeEdu" Educational Game*. in *International Conference on Computer Supported Education*. 2019. Springer.
 12. Bittencourt, I.I., et al., *Flow experience in learning: when gamification meets artificial intelligence in education*. 2018.
 13. Brühlmann, F., E. Mekler, and K. Opwis, *Gamification from the perspective of self-determination theory and flow*. University of Basel, 2013.
 14. Costa, C.J. and M. Aparicio, *Gamification: Software usage ecology*. *Gamification: software usage ecology*, 2018(1): p. 92-100.
 15. Lee, J.J. and J. Hammer, *Gamification in education: What, how, why bother?* *Academic exchange quarterly*, 2011. **15**(2): p. 146.
 16. Silpasuwanchai, C., et al. *Developing a comprehensive engagement framework of gamification for reflective learning*. in *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems*. 2016.
 17. Bittencourt, I.I., et al., *Validation and psychometric properties of the Brazilian-Portuguese dispositional flow scale 2 (DFS-BR)*. *PloS one*, 2021. **16**(7): p. e0253044.

O CRESCIMENTO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEU POTENCIAL POLUIDOR: UM ESTUDO NA CIDADE DE MACEIÓ

Ana Paula Macêdo ¹ and Livia Vilela ²

¹ Centro Universitario Cesmac; 2326783618@academico.cesmac.com.br

² Centro Universitário Cesmac; livia.vilela@cesmac.edu.br

Resumo: O crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil tem sido impulsionado por incentivos governamentais, pela comercialização de energia (geração distribuída) e pela busca por fontes limpas de energia. Inserido nesse contexto, o município de Maceió ainda é favorecido pela alta incidência solar durante todo o ano, o que fez aumentar substancialmente a demanda por instalações fotovoltaicas na última década. Contudo, esse progresso gera uma preocupação ambiental: o potencial poluidor dos painéis solares no fim de sua vida útil, estimada em 25 anos. Esses equipamentos contêm metais pesados, como chumbo e cádmio, que, se descartados incorretamente, podem contaminar o solo e a água chegando até os mares. Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de oferecer subsídios para estratégias de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos no município em estudo. A pesquisa foi baseada em dados da Agência Nacional de Energia Elétrica, relatórios técnicos internacionais e bibliografias indexadas. Foi constatado que a ausência de legislação específica e de uma política de logística reversa e infraestrutura de reciclagem em Maceió podem resultar em um grande volume de lixo eletrônico sem destino e tratamento definidos, reforçando a urgência de protocolos eficazes para o descarte e reciclagem de painéis, garantindo um avanço tecnológico verdadeiramente sustentável.

Palavras-chaves: Resíduos fotovoltaicos, logística reversa, reciclagem.

1. INTRODUÇÃO

A adesão à geração de energia fotovoltaica no Brasil vem crescendo exponencialmente, isso tem se dado por diversos fatores, tais como políticas de incentivo fiscal para uso de energias renováveis, resoluções que permitem a comercialização de energia, denominada geração distribuída que vem sendo regulamentada desde a Resolução nº 482 de 2012, que permitiu desde então a obtenção de créditos por energia gerada excedente por meio da distribuidora de energia local, o que promoveu ganhos econômicos ao gerador. Além disso, a conscientização pelo uso de energias limpas e renováveis tem crescido local e globalmente.

Embora a energia fotovoltaica tenha se popularizado, o que é um aspecto positivo do ponto de vista ambiental em relação ao uso de combustíveis fósseis, esse avanço traz consigo uma preocupação, os impactos ambientais provocados pelos resíduos fotovoltaicos. Apesar da vida útil de um painel solar ser estimada em média em 25 anos [1], considerando que essa tecnologia já vem sendo utilizada no Brasil desde 2009 [2], o tempo para desenvolver estratégias para evitar danos ambientais vem se esgotando.

É importante destacar que o Brasil é o maior gerador de resíduos eletroeletrônicos da América Latina[3], o que será potencializado com o descarte de toneladas de painéis fotovoltaicos quando chegarem ao fim de sua vida útil. Nesse sentido, este estudo busca trazer à tona dados imprescindíveis para formação de estratégias de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos no município de Maceió, capital alagoana, uma vez que, o crescimento da energia fotovoltaica no município iniciou em 2015 [2] e vem se popularizando cada vez mais, seguindo o *boom* de crescimento do setor fotovoltaico no país.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa, de natureza exploratória e quantitativa, visou obter informações sobre o volume, manuseio e destinação de resíduos fotovoltaicos no município de Maceió, Alagoas. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica em artigos nacionais e internacionais, focada em temas como o reaproveitamento, a reciclagem, a classificação e a composição dos painéis solares, bem como relatórios técnicos da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA). A investigação também incluiu um levantamento das normas técnicas e das legislações brasileiras sobre o descarte de resíduos eletroeletrônicos.

Posteriormente, foram coletados dados sobre o volume de painéis solares instalados em Maceió, por meio de consultas à concessionária de energia local e à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsáveis pelo registro, aprovação e liberação de sistemas de energia fotovoltaica. Adicionalmente, foi verificado, junto aos órgãos ambientais e de limpeza do município, o método atual de descarte dos painéis e se empresas locais já recebem equipamentos danificados ou em fim de vida útil, assim como os métodos de aplicação de logística reversa adotados por empresas comerciantes de painéis no município.

3. RESULTADOS

É importante compreender que uma célula fotovoltaica tem potência entre 4W a 5W [5] e por isso elas precisam ser agrupadas em série e paralelo, fornecendo maior potência e assim, conseguindo alimentar equipamentos elétricos. Quando células fotovoltaicas são agrupadas formam módulos fotovoltaicos, usados para atender cargas pontuais como iluminação e instrumentos de medição em áreas remotas, onde não há rede de distribuição de energia elétrica disponível. Contudo, ainda assim apenas um módulo fotovoltaico não conseguiria atender diversas cargas, como é o caso de residências, logo estes módulos também precisam ser agrupados em série e paralelo, formando por fim, painéis fotovoltaicos, a potência de um painel solar varia de 5W a 730W [6] a depender do fabricante e aplicação.

Compreendida esta classificação, podemos nos debruçar sobre a composição de um painel solar. Vamos nos ater ao painel solar de Silício Cristalino (c-Si) por representar mais de 90% do mercado brasileiro[7] e o município de Maceió segue essa realidade.

Estes painéis possuem uma estrutura composta por um quadro/moldura geralmente confeccionado em alumínio (Al), uma capa de vidro temperado, abaixo da capa tem-se o encapsulante que é geralmente de etileno acetato de vinila (EVA), este encapsulante também é aplicado após as células fotovoltaicas, ou seja, na parte inferior do painel, as células fotovoltaicas de silício que são a parte principal do módulo fotovoltaico, o Backsheet ou Folha traseira que é uma camada protetora de vários materiais poliméricos fluorados como fluoreto de polivinila (PVF) e por fim, a caixa de junção que fica localizada na extremidade do painel, trata-se da conexão central entre todas as conexões elétricas.

Os metais pesados utilizados na fabricação de painéis fotovoltaicos estão presentes no material semicondutor e nas soldas de conexão dos seus componentes, eles representam 0,053% de um painel fotovoltaico [7], contudo os impactos provocados ao meio ambiente e à saúde humana são significativos.

Os metais influenciam no funcionamento dos organismos, mas podem provocar danos aos seres vivos em altas concentrações, além de se acumular na cadeia trófica [9]. São exemplos, o chumbo que pode comprometer o sistema nervoso, reprodutor e cardiovascular e o cádmio, que é um agente cancerígeno e mutagênico, podendo causar alterações fisiopatológicas em casos de exposição a ele [10].

A quantidade de resíduos fotovoltaicos é crescente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) revela que a potência instalada de geração distribuída em Maceió cresceu de 15kW em 2015 para 162.471,20kW em junho de 2025 [2], um crescimento vertiginoso, que refletirá em um grande volume de resíduos fotovoltaicos.

É importante salientar que existem dois sistemas de energia fotovoltaicas: o *on-grid* (ligado a rede da distribuidora local) e o *off-grid* (ligado a bancos de baterias) sem contato com a rede local. Embora apenas os sistemas ligados à rede, ou seja, *on-grid* sejam

registrados pela ANEEL, foi possível extrair os dados de sistemas off-grid no Brasil por meio dos relatórios da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) que demonstrou que até 2024 a potência instalada *off-grid* no Brasil é de 6.660MW ou seja 6.660.000kW [11].

Considerando que o painel mais vendido hoje no mercado brasileiro é o de 500Wp, podemos estimar que temos instalados em Maceió cerca de 325 mil painéis fotovoltaicos, considerando que a Jinco foi a fabricante de painéis mais importados do país em 2024 [6] e o peso desse painel é de 23kg então, neste cenário, o volume de resíduos futuro estaria próximo de 7,5 toneladas, desde que não houvessem novas instalações fotovoltaicas, como a adesão a energia fotovoltaica ainda não saturou a sua capacidade instalada, o volume futuro será muito maior.

Enquanto isso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída em 2010 pela Lei nº12.305/10, incentiva a logística reversa de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) e estabelece metas para evitar a destinação desses resíduos em aterros sanitários e lixões, porém, não há uma legislação específica para reciclagem de painéis solares, assim como o estabelecimento do destino correto para esse lixo eletrônico.

É importante destacar, que a Resolução número 401 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece limites para uso de substâncias tóxicas apenas em pilhas e baterias e responsabiliza os fabricantes pela coleta destes materiais e seu encaminhamento para reciclagem [12].

Trazendo essa realidade para o município de Maceió, a ALURB (Autarquia Municipal de Limpeza Urbana) não possui dados de volumes de resíduos fotovoltaicos e não se responsabiliza pela coleta desse tipo de resíduo, uma vez que atende as prerrogativas do PNRS de 2010, o qual responsabiliza a logística reversa ao fabricante, comerciante e consumidor final no que tange a esse tipo de resíduo. Contudo, o consumidor entrando em contato com o órgão municipal receberá informações de cooperativas e empresas que têm interesse em resíduos eletrônicos.

Foi constatado que apenas uma empresa tem recepcionado e coletado resíduos eletroeletrônicos no município, trata-se da BioDigital, esta empresa também tem absorvido os resíduos de outros municípios, uma vez que a natureza particular desses resíduos exigem mão de obra e procedimentos específicos, porém ainda foi estimado procedimentos em relação a resíduos de painéis fotovoltaicos.

Também foi verificado que a maioria das empresas comerciantes de sistemas de geração fotovoltaica em Maceió, não tem claro seu papel frente a destinação de resíduos fotovoltaicos. Isso porque devido a garantia fornecida pelo fabricante, módulos danificados são substituídos, porém essas empresas não têm em seus procedimentos operacionais uma metodologia com relação a tratativas de painéis em fim de vida útil.

4. DISCUSSÃO

A crescente adesão a energia fotovoltaica trás muitos benefícios do ponto de vista ambiental, porém não deve ser considerado um sistema de geração de energia sustentável, tendo em vista que formas de reciclagem de painéis fotovoltaicas ainda não estão disponíveis em larga escala, o que tem preocupado a comunidade científica e órgãos internacionais ao redor do mundo [13], visto que sua composição conta com a participação de metais pesados que podem trazer danos ao meio ambiente e à saúde humana.

A ausência de procedimentos objetivos, legislação específica e educação ambiental sobre resíduos fotovoltaicos tem se configurado em um problema que vem crescendo a cada dia e este não tem sido um desafio apenas de Maceió, mas global.

4. CONCLUSÃO

A pesquisa demonstrou que o crescimento da energia solar no município de Maceió tem se dado de forma extraordinária, devido à maior conscientização ambiental e incentivos econômicos.

Contudo, do ponto de vista da sustentabilidade a geração de energia fotovoltaica ainda está caminhando a passos lentos no município, isso devido a falta de políticas de tratamento e orientação quanto aos resíduos dos sistemas instalados quando estiverem no final de sua vida útil.

Portanto, é necessário que o poder público esteja alinhado e alimentado de informações quanto ao volume de resíduos que precisarão, no futuro muito próximo, gerenciar. Conhecer e incentivar possíveis captadores desses resíduos e nível de esclarecimento da responsabilidade de cada indivíduo nesse processo, principalmente porque esse tipo de resíduo não deve ser disposto em aterros sanitários devido a contaminação por metais pesados que compõem um painel solar é urgente e necessário para adoção de protocolos e estratégias eficientes que possam ser absorvidas pela sociedade e assim evitar danos ambientais e humanos, por vezes, irreversíveis.

REFERÊNCIAS

1. JAHRENGENE, G. *et al.*. Gestão de Resíduos Fotovoltaicos: Tecnologias e Estratégias para Reciclar Resíduos Fotovoltaicos de c-Si e Cl(G)S. In: Lazou, A., Meskers, C., Olivetti, E., Diaz, F., Gökelma, M. (orgs.) REWAS 2025. TMS 2025. Série Minerais, Metais e Materiais. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80892-0_11 2025.
2. BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL (2025). Relatório de Geração Distribuída. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWl3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxliwidCI6IiQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9> . 2025
3. ALMEIDA, Marcelo Franco de; CAMPOS, Adriana Fiorotti. Desafios na gestão de resíduos eletroeletrônicos no Brasil: uma análise legislativa e ambiental, 21º Congresso nacional de meio ambiente, Poços de Caldas - MG, disponível em: <https://meioambientepocos.com.br/anais/Anais2024/Desafios%20Na%20Gest%C3%A3o%20De%20Res%C3%ADduos%20Eletroeletr%C3%B4nicos%20No%20Brasil%20Uma%20An%C3%A1lise%20Legislativa%20E%20Ambiental.pdf> 2024.
4. TRIPATHI, A.*et al.*. Estratégias de recuperação para painéis solares de fim de vida: práticas sustentáveis e de economia circular. *Materiais Verdes* 2025; <https://doi.org/10.1680/jgrma.24.00153>
5. CASTRO, R. Introdução a energia fotovoltaica. Universidade Técnica de Lisboa. 2002.
6. ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. 2025.
7. SOUSA, N. *et al.*, Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles, *Social Sciences & Humanities Open*, Volume 7, Issue 1, 2023, 100456, ISSN 2590-2911, <https://doi.org/10.1016/j.ssho.2023.100456>.
8. MONIER, V; HESTIN, M. Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive. 2011.
9. YASHAS SR, *et al.*, Catalytic recovery of metals from end-of-life polycrystalline silicon photovoltaic cells: Experimental insights into silver recovery. *Waste Manag.* 2023 Sep 1;171:184-194. doi: 10.1016/j.wasman.2023.08.038. Epub ahead of print. PMID: 37660631.
10. SHARMA HB, *et al.* Evaluation of heavy metal leaching under simulated disposal conditions and formulation of strategies for handling solar panel waste. *Sci Total Environ.* 2021 Aug 1;780:146645. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146645. Epub 2021 Mar 21. PMID: 34030301.
11. IRENA. International Renewable Energy Agency. Renewable energy statistics 2025. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2025/Jul/Renewable-energy-statistics-2025> 2025.
12. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA Nº 401, de 05 de setembro de 2008. Estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado, e dá outras providências. Brasília, DF: Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=570 .
13. AKRAM, H. *et al.* Comprehensive review of the global trends and future perspectives for recycling of decommissioned photovoltaic panels. *Waste Manag.* 2024 Feb 15;174:187-202. doi: 10.1016/j.wasman.2023.11.025. Epub 2023 Dec 5. PMID: 38056367.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Fuligem da cana-de-açúcar e os Polímeros Plásticos Reciclados como substitutos parciais dos componentes do concreto: Resultados Preliminares

Victoria Kamille de Castro Almeida ^{1,2*}, Clarissa Nascimento Soares ^{1,2}, Maria Fernanda Torres dos Santos ^{2,3}, Marcos Santana dos Santos ^{2,4}, Marcelo Reis ^{1,2} e Jessé Marques da Silva Júnior Pavão ^{1,2}

¹ Programa de Pós-Graduação em Análises de Sistemas Ambientais, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

² Laboratório de Energia e Resiliência de Ecossistemas - LERE, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

³ Graduanda em Design, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

⁴ Graduando em Engenharia Civil, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

* Correspondência: victoriakamilleca@gmail.com

Abstract: Population growth has contributed to the increase in environmental issues, such as the inadequate disposal of plastics, the excessive use of natural resource, and the production of construction materials with high energy consumption and pollutant emissions. In this context, the present study aims to evaluate the mechanical efficiency and feasibility of partially replacing cement, sand and gravel with sugarcane soot and recycled plastic polymers (PET and EPS) in the production of a sustainable non-structural concrete. Experimental mixtures were prepared with different proportions of sugarcane soot and a fixed 15% content of polymers, and subjected to compressive strength, tensile strength, specific mass, water absorption by immersion, and void index tests, comparing the results with reference mixtures. It was found that, except for the concrete containing 5% soot, all other mixtures were suitable for non-structural applications. An increase in porosity and water absorption was also observed, which may lead to a potential reduction in durability. Based on preliminary results, it was determined that the proposed mixture demonstrated mechanical efficiency for non-structural use, while contributing to the mitigation of environmental impact and greenhouse gas emissions, in alignment with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Marine Pollution; Reuse of organic waste; Polymers; Sustainable Concrete, Reduction of carbon emissions.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem colaborado com o aumento do consumo de produtos industrializados, e um deles é o plástico, polímero que não se decompõe facilmente, tornando-o assim um problema, devido ao seu descarte irregular [1]. Em 2020, estimou-se que o brasileiro produz em torno de 379,2kg de lixo diariamente, sendo mais de 1kg por dia [2]. Já em 2021, dados apontaram que 85% dos resíduos que chegam aos oceanos são plásticos, cuja degradação libera microplásticos capazes de afetar os ecossistemas e saúde tanto dos seres humanos, quanto dos marinhos, causando asfixia, envenenamento, distúrbios comportamentais e de desenvolvimento e fome. Tendo já sido encontrados na corrente sanguínea, fígados, placentas e cordões umbilicais [3 e 4].

Outro material amplamente utilizado e ambientalmente impactante, é o cimento, que desde a sua extração, causa degradações ao ecossistema local [5]. Sua produção, principalmente durante a fabricação do clínquer (principal componente do cimento Portland), demanda altas quantidades de energia, e emite partículas poluidoras na atmosfera [6]. O seu manuseio inadequado pode causar lesões cutâneas, oculares e pulmonares [7]. E ao ser descartado incorretamente, contribui para a obstrução de córregos, tráfego de pedestres e a proliferação de vetores.

Diante disso, a hipótese do estudo teve lastro no desenvolvimento de artefatos de concreto não estrutural utilizando a fuligem da cana-de-açúcar como substituto parcial do cimento, e os polímeros plásticos como substitutos parciais dos agregados naturais (areia e brita). O uso dos polímeros visa mitigar a poluição marinha, por meio do reaproveitamento dos resíduos plásticos reciclados, enquanto a fuligem, abundante regionalmente e rica em sílica (SiO₂) - aditivo mineral capaz de substituir parcialmente o cimento em concretos e argamassas, manifesta alto potencial de reaproveitamento, contribuindo com a redução dos impactos ambientais [8]. Logo, foram realizados ensaios, cujos resultados preliminares, indicaram a boa eficiência mecânica e técnica para o uso não estrutural. Fazendo com que a sua produção contribua com a redução de um dos principais problemas ambientais: o descarte desordenado e irregular de resíduos orgânicos e inorgânicos na natureza, dando-lhe uma destinação diversa e sustentável, com eficiência energética, através da redução da emissão de gases de efeito estufa. Representando também um avanço na indústria da construção civil e na indústria alimentícia, sucoalcooleira e da reciclagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa bibliográfica baseou-se em artigos, dissertações, revistas e jornais que foram obtidos em plataformas como Google Acadêmico, Scielo e Periódicos Capes. A etapa experimental está sendo realizada, majoritariamente, no Laboratório do Núcleo de Ciências Exatas e Tecnológicas, com atividades complementares executadas no laboratório especializado em concretos, Tecnosenge Tecnologia e Serviços de Engenharia Ltda.

A metodologia baseou-se em análises de experimentos previamente consolidados [9], com substituição do Polipropileno (PP) e Poliestireno (PS) por PET, obtido através da coleta desempenhada por catadores vinculados à Startup Policoncret, higienizados e triturados em um moinho triturador com capacidade de 200-250kg, pelo Projeto Oceanos de Plástico (CESMAC). Foi utilizada areia fina lavada e brita 0, pelo fácil manuseio e a adequação a acabamentos, e cimento Portland CPV-ARI 40-RS, devido à sua alta resistência inicial, baixo teor de fíler, alta finura, secagem rápida e maior resistência à compressão final, sendo indicado para elementos pré-moldados [10]. Já o material orgânico foi obtido através da Cooperativa Pindorama, que forneceu 38 kg do material em formato de fuligem, necessitando apenas de secagem ao sol [11 e 12].

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados como referências: o traço convencional (TC), composto por areia, brita, água e cimento, e o traço com polímeros (TP) [13], que inclui o polímero reciclado PET, como substituto parcial do agregado miúdo (areia) e o EPS, do graúdo (brita). E confeccionados 4 traços para analisar o desempenho e a eficiência mecânica de variações de 5%, 10%, 15% e 20% da fuligem da cana com os polímeros (TPF), como pode ser possível observar na Tabela 01.

Assim como foram realizados os ensaios exigidos pelas normas que determinam como o ensaio de resistência à compressão, absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios devem ser feitos [14 e 15], e que já foram aplicados nos estudos utilizados como referência.

Cada tipo de traço produzido resultou em 16 corpos de provas que foram rompidos aos 7, 14, 21 e 28 dias, que correspondem aos dias de cura, totalizando no total de 64 amostras produzidas. Também foram executados os testes de granulometria, conforme a norma, que define a composição granulométrica do material a ser testado [16], e o de umidade, seguindo a norma que relata como deve ser realizada a preparação para os ensaios de compactação e de caracterização dos materiais [17], para determinar o teor de umidade dos materiais testados e a dimensão das suas partículas. A execução da nova etapa se deu a partir da realização de 4 traços que analisou o desempenho e a eficiência mecânica de variações de 5%, 10%, 15% e 20% da fuligem da cana com os polímeros (TPF), como pode ser possível observar na Tabela 1.

Tabela 1. Quantidades dos materiais que serão utilizados

Concretos	Aglomerantes		Agregados miúdos		Agregados graúdos		Água (kg)
	Cimento (kg)	Fuligem (kg)	Areia fina lavada (kg)	PET (kg)	Brita (kg)	EPS (kg)	
TC ¹	13.500	-	28.290	-	30.000*	-	6.710
TP ²	13.500	-	25.461	1.168	28.500*	0.013	6.710
TPF ³ 5%	12.825	0.209	25.461	1.168	28.500**	0.013	6.710
TPF 10%	12.150	0.419	25.461	1.168	28.500	0.013	6.710
TPF 15%	11.475	0.628	25.461	1.168	28.500	0.013	6.710
TPF 20%	10.800	0.837	25.461	1.168	28.500	0.013	6.710

¹ Concreto convencional

*Brita 3/4

² Concreto com polímeros

**Brita 0

³ Concreto com polímeros e fuligem da cana-de-açúcar

2.1 Confeção dos concretos

A confecção dos traços não diferiu do concreto convencional, sendo necessário somente a adição do material orgânico e inorgânico. Inicialmente, os materiais foram separados e pesados: cimento, areia e brita em uma balança com capacidade de 300kg, e os demais em uma balança de bancada de até 10kg, antes de serem inseridos na betoneira (Figuras 1 e 2). Após a preparação do concreto, a próxima fase foi o desenvolvimento do teste de slump, conforme a norma que verifica a consistência e trabalhabilidade do concreto [18]. Em seguida, os corpos de prova foram preenchidos conforme a norma que especifica o procedimento para a moldagem e a cura dos corpos de prova [19]. Após 24 horas, foram desmoldados, identificados pelo tipo de traço e data de produção, e transportados até as instalações do laboratório da Tecnosenge, onde foram mantidos até atingirem as idades de rompimentos referentes ao ensaio de compressão.



Figura 1- Fuligem da cana sendo pesada



Figura 2- Materiais inseridos na betoneira

Com exceção dos testes de tração, calculados a partir dos ensaios de compressão, conforme a norma que estabelece os procedimentos de projetos de estrutura de concreto [20], os demais ensaios seguiram os procedimentos padrão de laboratórios, tendo como única adaptação, a pesagem dos corpos de prova imersos, considerando o empuxo para obter os valores reais da imersão (Figuras 03 e 04).



Figura 3- Amostras em processo de ebulição



Figura 4- Amostra saturada sendo pesada

3. RESULTADOS PRELIMINARES

3.1. Análise de resistência à tração e compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração executados nos concretos testados podem ser observados na Tabela 2:

Tabela 2. Resultados dos ensaios de resistência à tração e compressão efetuados nos concretos experimentais.

Concreto	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
TC ¹	99.88	194.26	2.98	19.07
TP ²	100.23	194.60	2.53	19.73
TPF ³ 5%	100.73	196.12	2.38	22.30
TPF 10%	100.75	196.23	2.21	20.00
TPF 15%	100.82	196.46	1.97	16.80
TPF 20%	100.93	197.02	2.13	18.90

¹ TC: Concreto Convencional;² TP: Concreto com Polímeros;³ TPF: Concreto com Polímeros e Fuligem da cana-de-açúcar.

Ao analisar os dados foi possível observar que os traços contendo 5% e 10% da fuligem apresentaram resultados superiores aos de referência (22.30 e 20.00). Enquanto que os demais, apresentaram resultados pouco inferiores, com destaque para o TPF 15% (16.80). Enquanto que na resistência à tração, ambos os resultados apresentaram uma redução em relação aos de referência, onde o mais próximo foi 2.38 (TPF 5%), e o menor, 1.97 (TPF 15%).

Mesmo apresentando boas propriedades mecânicas, a maior parte dos resultados preliminares apresentados não conseguiram atingir os valores de classe de resistência estrutural determinado na norma que classifica o uso do concreto a partir da massa específica, resistência e consistência [21] (igual ou superior a 20MPa). Tendo como exceção somente os concretos contendo 5% e 10% da fuligem, com 22.30 Mpa e 20.00 MPa. Porém, é possível determinar que os resultados obtidos nos testes de compressão e tração são satisfatórios para o emprego em concretos não estruturais.

3.2. Análise de absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica realizados inicialmente no 28º dia de cura e finalizado somente sete dias depois, após a fervura as pesagens dos corpos de prova podem ser visualizadas abaixo, na Tabela 04.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica efetuados nos concretos experimentais.

Concreto	Massa (g)			Massa específica (kg/dm³)			Volume real (cm³)	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
	Seca	Imersa	Saturada	Seca	Saturada	Real			
TC ¹	3313	2009	3567	2.127	2.869	2.540	1558	7.660	16.270
TP ²	3307	2023	3579	2.126	2.300	2.578	1556	8.230	17.510
TPF ³ 5%	3174	1570	3470	1.671	1.826	1.979	1815	9.326	15.579
TPF 10%	3170	1570	3468	1.670	1.827	1.981	1816	9.401	15.702
TPF 15%	3216	1572	3513	1.657	1.810	1.956	1810	9.245	15.315
TPF 20%	3206	3515	3515	1.648	1.807	1.960	1820	9.648	15.901

¹ TC: Concreto Convencional;² TP: Concreto com Polímeros;³ TPF: Concreto com Polímeros e Fuligem da cana-de-açúcar.

A avaliação da comparação dos valores médios da massa específica dos experimentos com os de referências (TC e TP) revelou uma redução dos valores, especificamente na massa específica seca das amostras com 20% (1.648kg/dm³) da fuligem, possivelmente relacionado à menor densidade dos materiais substituídos. O mesmo pôde ser observado na massa específica real que cujos resultados foram menores aos dados de referência, indicando que a substituição parcial afetou, significativamente, a densidade. Assim como foi possível observar um aumento na absorção de água por imersão, sendo o TPF 20% a amostra com o maior percentual (9.648%).

Porém, tais resultados indicam que mesmo após as alterações de quantidades, ambas as amostras (5,10,15 e 20%) podem ser classificadas como concreto comum e de boa durabilidade, levando em conta que o material em estudo será para fins não estruturais. O índice de vazios, apresentou variações pouco inferiores as de referência, sendo o maior resultado referente ao TPF 20% (19.70). Tais resultados indicam que a adição contribuiu com a redução da presença de vazios e ao aumento de resistência do concreto.

4. DISCUSSÃO

Os resultados preliminares, apresentaram variações nos valores dos experimentos em relação aos traços de referência (TC e TP), com resistência à compressão variando até 22.30Mpa proveniente do experimento com 5% da fuligem (TPF 5%), e a resistência à tração, com índices ligeiramente inferiores, sendo em até 33.89%. Contudo, ambos os experimentos apresentaram resultados positivos para aplicações não estruturais, e somente o com 5% e 10% se mostraram aptos para serem utilizados em aplicações estruturais.

Durante a avaliação dos ensaios de massa específica, foi perceptível que os experimentos apresentaram uma redução significativa ao serem comparados com as referências, onde o menor resultado decorreu do TPF 20% (1.648) e o maior do TP 10% (1.981). Tais demonstrações evidenciam um aumento na porosidade e na absorção, fazendo com que a densidade dos concretos testados seja menor fazendo com que os mesmos sejam mais leves.

Por conseguinte, mesmo sendo resultados preliminares, a substituição parcial do cimento, areia e brita pela fuligem da cana-de-açúcar e os polímeros plásticos reciclados demonstrou boa eficiência e viabilidade técnica e mecânica, e bom potencial de durabilidade para concretos não estruturais, desde que o teor de substituição seja seguido conforme o recomendado.

5. CONCLUSÕES

O uso da fuligem da cana-de-açúcar como substituto parcial do cimento, e dos polímeros plásticos (PET e EPS) como substitutos parciais dos agregados naturais em concretos não estruturais apresentou resultados preliminares satisfatórios com boa eficiência mecânica, e potencial para contribuir com a redução do uso de recursos naturais, impacto e degradação ambiental, poluição marinha e das emissões de gases de efeito estufa. Estando também alinhado a alguns Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, como: 9- Indústria, Inovação e Infraestrutura; 11- Cidades e comunidades sustentáveis; 12- Consumo e produção responsáveis; 13- Ação contra a mudança do clima; 14- Vida na água; e 17- Parcerias e meios de implementação. Sendo um projeto economicamente viável, de fácil replicabilidade e capaz de causar impactos sociais através da cooperação entre universidades, indústrias sucroalcooleiras e da construção civil, e empresas de reciclagem, pois promoverá parcerias estratégicas e colaborações que irão proporcionar novas formas de implementar soluções sustentáveis em larga escala.

Financiamento: A presente pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq Brasil, no âmbito do processo 405449/2022-4, "Projeto Oceanos de Plástico: Monitoramento da cadeia produtiva do plástico integrando estratégias de descarte e reciclagem para enfrentamento da poluição." Coordenado pelo Dr. Jessé Marques da Silva Júnior Pavão.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer a Instituição Centro Universitário Cesmac, ao Programa de Pós-Graduação em Análises de Sistemas Ambientais (PPGASA), Ao Projeto Oceanos de Plástico (n. 405449/2022-4) e ao Laboratório de Emergência e Resiliência de Ecossistemas (LERE).

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

REFERÊNCIAS

1. Moreira, T. O que é o plástico biodegradável e sua importância. **eCycle**. 2024, Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/plastico-biodegradavel/>. (Acesso em: 05 mai. 2025).
2. Agência Senado. Aumento da produção de lixo no Brasil requer ação coordenada entre governos e cooperativas de catadores. **Agência Senado**. 2021, Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2021/06/aumento-da-producao-de-lixo-no-brasil-requer-acao-coordenada-entre-governos-e-cooperativas-de-catadores>. (Acesso em: 05 mai.2025).

3. UNEP. From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution. **UNEP**. 2021, Disponível em: <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>. (Acesso em: 05 mai.2025).
4. G1 AL. Cientistas brasileiros encontram microplásticos na placenta e no cordão umbilical de grávidas. **G1**, Maceió. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2025/07/27/cientistas-brasileiros-encontram-microplasticos-na-placenta-e-no-cordao-umbilical-de-gravidas.ghtml>. (Acesso em: 28 jul. 2025)
5. Silva, B. P.; Reiner, G. A exposição da sílica ao trabalhador da construção civil no processo de fabricação da argamassa. *Grupo Fasipe Educacional*. **2020**. Disponível em: <https://repositorio.fasipe.com.br/items/a7699588-f5da-45f2-bcd7-277080f6db4f/full>. (Acesso em: 02 mai. 2024).
6. Costa, E. B.; Nobre, T.R.S.; Guerreiro, A. Q.; Mancio, M.; Kirchheim, A.P. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. *Ambiente Construído*, **2013**, v. 13 (2), pp. 75-86. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200007>
7. Maury, M.B; Blumenschein, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. *Sustentabilidade em debate*, **2012**, v. 3(1), pp. 75-96. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v3n1.2012.7199>.
8. Paula, M.O.; Tinôco, I. F.F.; Rodrigues, C. S.; Silva, E. N.; Souza, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. **2009**, v.13 (3), pp. 353-357. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000300019>.
9. Feitosa Júnior, E. A. Análise da incorporação de materiais poliméricos em concretos: uma alternativa para a diminuição do aporte de plásticos no ambiente. Dissertação (Mestrado em Análise de Sistemas Ambientais), Centro Universitário Cesmac, Maceió, 2019.
10. Pugliesi, N. Cimento: Diferentes tipos e aplicações. *Associação Brasileira de Cimento Portland*, São Paulo, **2018**. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>. (Acesso em: 14 nov. 2024).
11. Capelin, L. J.; Moraes, K. K.; Zampieri, J.P.; Vanderlei, R. D. Avaliação dos efeitos da fibra do coco e da microcelulose cristalina nas propriedades de argamassas cimentícias. *Revista Matéria*, **2020**, v. 25 (01). <https://doi.org/10.1590/S1517707620200001.0876>.
12. Toledo filho, R. D.; England, G. L.; Ghavami, K. Comportamento em compressão de argamassas reforçadas com fibras naturais: I Relação tensão deformação experimental e processo de fratura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. **1997**, v.1, pp. 79-88. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v1n1p79-88>.
13. Pacheco, R. L.; Soares, C. N.; de Santana, R. S. P.; dos Santos, A. F.; de Santana, M. S. A.; & Pavão, J. M. D. S. J. Polymer aggregate as a sustainable alternative for concrete production. *Revista de Gestão Social e Ambiental* **2025**, 19(3), pp.1-22. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n3-100>
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 (2019). *Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778 (2009). *Argamassa e concreto endurecidos-Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 (2003). *Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 6457 (2016). *Amostras de solo- Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: ABNT.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 67 (1998). *Concreto- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro: ABNT.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 (2015). *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: ABNT.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 (2014). *Projeto de estruturas de concreto-Procedimentos*. Rio de Janeiro:ABNT.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953 (2015). *Concreto para fins estruturais-Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro: ABNT.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Análise Climatológica da precipitação para o estado de Alagoas para 2024, com foco nas áreas acumuladoras de detritos flutuantes na região do CELMM.

João Paulo Seabra de lima ^{1,2}, João Paulo dos Santos Souza ^{1,2}, Thyago Anthony Soares Lima ^{3,4}, Marcelo reis ^{1,2}, Alessandro Sarmento Cavalcanti ^{1,2} e Jessé Marques da Silva Júnior Pavão ^{1,2}

- 1 Post-graduate Program in Analysis of Environmental Systems, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brazil.
- 2 Emery and Ecosystem Resilience Laboratory - LERE, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brazil.
- 3 Institute of Science and Technology, São Paulo State University (Unesp), São José dos Campos, SP, Brazil.
- 4 Graduate Program in Natural Disasters, (Unesp/Cemaden), São José dos Campos, SP, Brazil.

Abstract: Este artigo apresenta uma metodologia de estimativa para a melhor visibilidade de detritos plásticos utilizando variáveis de natureza estatística básicas como a média e a mediana, destacando-se a mediana por apresentar o valor mais significativo evitando os valores extremos em uma observação e a precipitação como condição inicial, sendo ponto de partida para futuras pesquisas. A relevância desse estudo inicial sob a variação espacial e temporal é que ainda são necessárias muitas pesquisas, o estado da arte atual para pesquisa ainda está limitado a muitas condicionantes como os falsos positivos e erros de sub-grade e muitos problemas ligados ao sensoriamento remoto. Ainda sim, obtemos bons resultados indicando a variabilidade sazonal dos pontos de detritos e estamos em busca de uma melhor classificação principalmente em relação aos plásticos observados em uma região bastante complexa.

Keywords: Plásticos; Sensoriamento remoto; Precipitação; CELMM.

1. INTRODUÇÃO

A grande tarefa para o sensoriamento remoto está em catalogar e classificar detritos flutuantes, principalmente em áreas onde elementos físico-químicos como composição química, turbidez, materiais sólidos, encontrados sob influência das correntes locais, sejam nas regiões costeiras quanto nas lagunares. Na região estudada observam-se pontos críticos que serão utilizados como referenciais para a dispersão de detritos flutuantes, a região costeira, nosso litoral oceânico e a região do complexo estuarino lagunar mundaú – manguba (CELMM).

Nesse contexto, o presente artigo apresenta um estudo sobre o regime de precipitação, as médias mensais e a mediana anual para esta região para o período do ano de 2024, buscando o período com menor influência das chuvas quando foi observado maior nitidez para os detritos plásticos em uma análise de sensoriamento remoto. Para isto, foram utilizados os relatórios de análise climática da Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas - Semarh (<https://www.semarh.al.gov.br/>). O estudo se concentra na experiência das análises sobre o comportamento de detritos flutuantes, feitas na plataforma Google Earth Engine (GEE) utilizando linguagem JavaScript e imagens de satélite Sentinel-2. Os dados possuem alta resolução espacial, com bandas que variam entre 10 e 20 metros, com instrument Imageador Multiespectral (MSI) com 13 bandas, cobrindo uma grande faixa do espectro eletromagnético, tanto visível (VIS), infravermelho (NIR) quanto infravermelho de ondas curtas (SWIR) e etc. Essa combinação de capacidade espectral e alta resolução radiométrica, torna possível diferenciar uma grande variedade de bandas de frequência do visível, infravermelho e infravermelho próximo, fundamentais na distinção de plásticos e de outros materiais que possam estar flutuando na água (DUARTE; AZEVEDO 2023).

Imageador Multiespectral (MSI) com 13 bandas, cobrindo uma grande faixa do espectro eletromagnético, tanto visível (VIS), infravermelho (NIR) quanto infravermelho de ondas curtas (SWIR) e etc. Essa combinação de capacidade espectral e alta resolução radiométrica, torna possível diferenciar uma grande variedade de bandas de frequência do visível, infravermelho e infravermelho próximo, fundamentais na distinção de plásticos e de outros materiais que possam estar flutuando na água (DUARTE; AZEVEDO 2023). Utiliza-se por construção os Índices por Diferença Normalizada para: Detritos Flutuantes (FDI), Algas Flutuantes (FAI), Vegetação (NDVI) e água (NDWI), especificamente mascarados estatisticamente observar a presença/ausência das desses elementos diante da menor quantidade de informação observada pelo satélite (pixel) e assim, reduzir efeitos que possam dificultar a captação correta da informação que consta nesse pixel como: sunglint, espuma, sedimentos em suspensão, macrófitas, margens rasas. Especialmente o sunglint que é um fenômeno de “ofuscamento” causado pela reflexão da luz em uma superfície que impede a observação de pixels captados pelo infravermelho próximo e escondem os resíduos flutuantes e assim, dificultando a observação dos resíduos sólidos de interesse para a coleta e utilização de resíduos plásticos coletados na região litorânea adjacente, nos mares, oceanos e lagunas de Alagoas, na confecção de artefatos de concreto não-estrutural.

O objetivo é analisar como o padrão local de precipitações ao longo do ano de 2024 pode contribuir para uma melhor visualização de detritos marinhos flutuantes nesta região, visto que, na região litorânea nos períodos secos ocorre uma maior concentração de detritos devido a atividade turística na região e a redução de atividade pluviométrica (Berto et al, 2025). Nesse sentido, busca-se estudar a região do CELMM que apresenta características morfológicas diferenciadas, sendo encontradas dificuldades de visibilidade devido a turbidez nas margens e maior fluxo na parte central as lagunas devido a alta velocidade de fluxo nesses pontos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada, é utilizar os resultados de sensoriamento remoto para fazer uma seleção de dias com cobertura de nuvens com limiar inferior a um determinado valor, para diminuir a visualização da superfície e assim, melhor obter o índice FDI, a partir disso, obter a média para cada mês e uma mediana anual.

Buscando reunir os pontos considerados críticos para a região do CELMM, levando-se em consideração os fatores de precipitação, localização e composição populacional dessas regiões.

Permitindo compreender as particularidades da região em geral bem como, pontos de desembocadura das chuvas e detritos, a capacidade transporte destes sedimentos ao longo do percurso lagunar e sua dispersão ao longo a foz do CELMM.

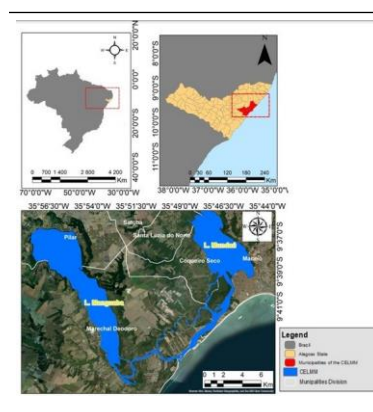


Figura 1- Região do complexo estuarino lagunar mundaú – manguaba (CELMM).

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Durante a análise dos dados pode-se notar a irregularidade das chuvas tanto do ponto de vista espacial quanto temporal, os meses de Janeiro, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro foram meses muito secos com precipitações abaixo de 70 mm. Para a cobertura de nuvens foram testados limiares para

a observação da variável FDI e obtendo sua média e mediana, obtendo como o maior valor 55% para a cobertura de nuvens, quando foram escolhidos os valores de 15%, 30%, 45% e 55% para as análises. Para cobertura de nuvens (CN), os valores de 15% e 30% foram observados diferenças significativas mas, entre 45% e 55% as tendências foram preservadas ao longo do período anual.

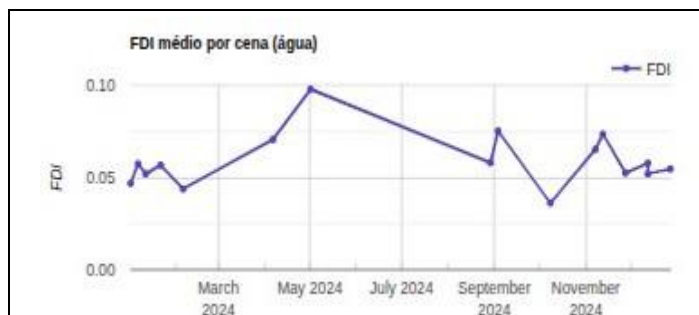


Figura 3- FDI médio avaliado para cada mês do ano de 2024 com cobertura de nuvens 30%.

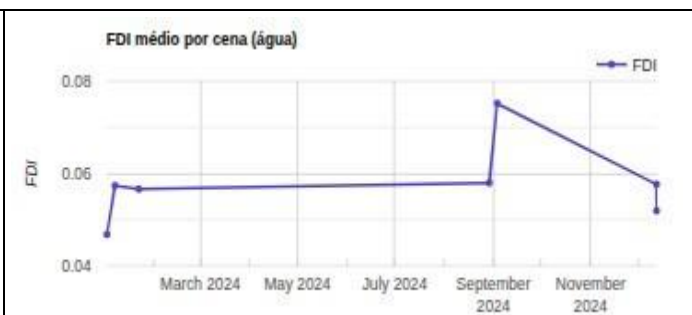


Figura 2- FDI médio avaliado para cada mês do ano de 2024 com cobertura de nuvens 15%.

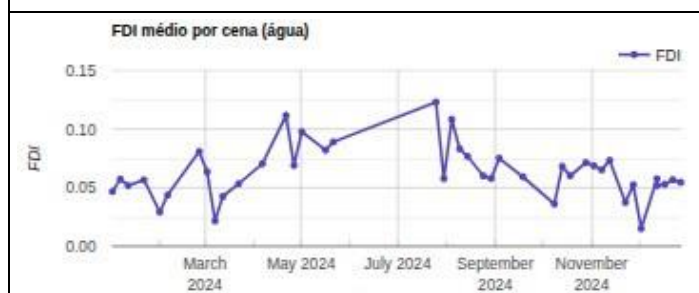


Figura 5- FDI médio avaliado para cada mês do ano de 2024 com cobertura de nuvens 55%.

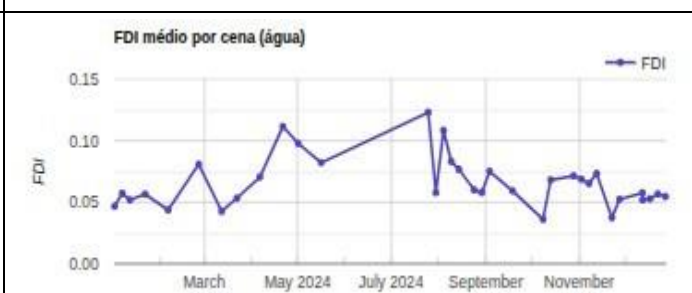


Figura 4- FDI médio avaliado para cada mês do ano de 2024 com cobertura de nuvens 45%.

Em relação a espacialização, pode-se notar que nos meses menos secos, com precipitações entre 25 e 50 mm em janeiro, agosto e setembro, janeiro se destaca com ponto isolados para o FDI na região mais acima da laguna mundaú e nos meses mais secos com precipitações abaixo de 25mm, de outubro a dezembro, mês de outubro encontram-se ponto isolados de detritos flutuantes em uma região relativamente próxima na parte ao norte da laguna mundaú.

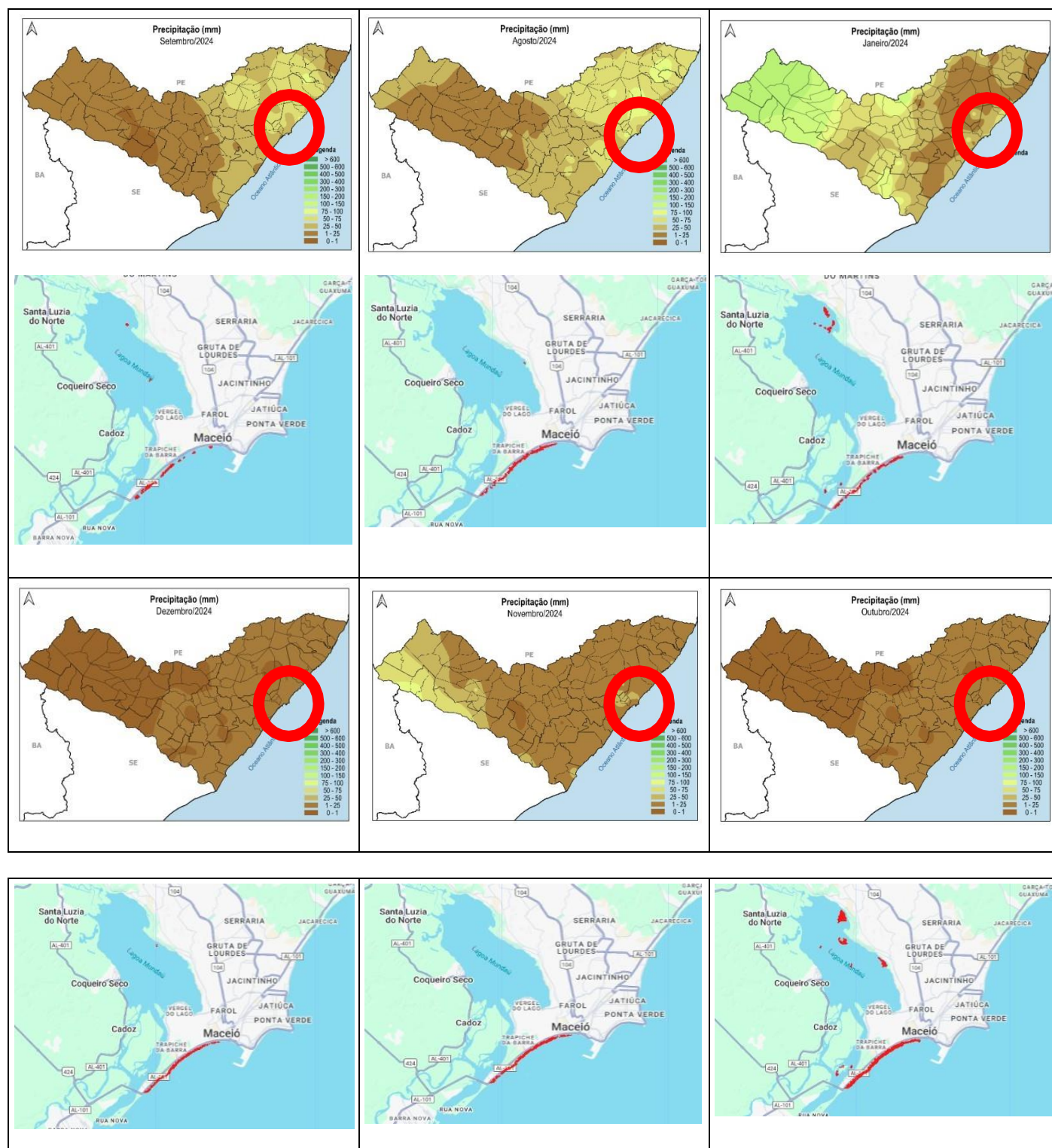


Figura 6- Perfil das precipitações observadas pela SEMARH para os meses com baixa precipitação e média para o FDI em cada respectivo mês.

Durante os meses de fevereiro a julho foram meses muito chuvosos com precipitações acima de 200 mm ocorre uma distribuição espacial de detritos flutuantes ao longo da laguna mundaú em praticamente todos os meses, a visível exceção é o mês de junho que não ocorreu a formação da imagem devido a sensibilidade da cobertura de nuvens para a captação da imagem. Destaque vai para a foz que tem uma quantidade acentuada de detritos flutuantes em maio e julho.

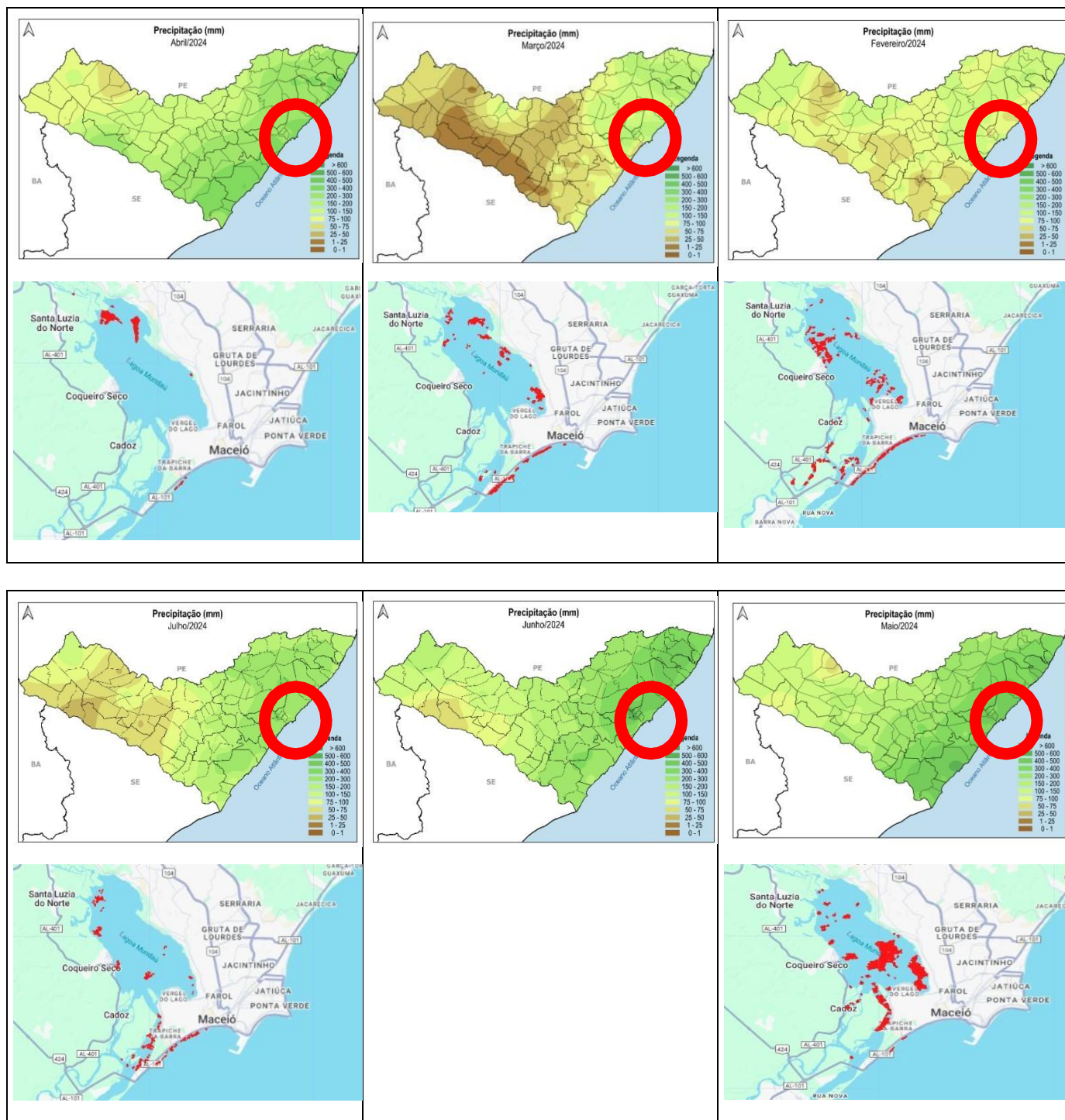


Figura 7- Perfil das precipitações observadas pela SEMARH para os meses com alta precipitação e média para o FDI em cada respectivo mês.

Para o cálculo da mediana para todo o ano de 2024 sendo destacados os pontos em vermelho contendo a localização e a distribuição em toda a área do CELMM na primeira imagem; na imagem central, tem-se a região mais a norte no bairro da Santa Amélia e na imagem a direita tem-se a foz do CELMM, considerados com a presença destes detritos.



Figura 8- Perfil da mediana para o FDI, calculada pelo GEE e observada pela satélite S2 da rede Copernicus para todo o período de 2024.

4. DISCUSSÕES

O processo de desenvolvimento desta pesquisa observaram-se muitos desafios, a questão do número excessivo de falsos positivos para os detritos flutuantes, que são comuns principalmente, em áreas que apresentam grande complexidade como o CELMM, a mediana é um medida de tendência central, que evita e/ou reduz a possibilidade de valores extremos que possam influir na resposta do sinal do satélite ou ainda, no cálculo do índice gerando tendências de leitura inexistentes de sub-grade comuns ou outros efeitos como sunglint, espuma, sedimentos em suspensão, macrófitas, margens rasas, ou ausência de informação no pixel que possam causar leitura inadequada de sinal e falsos ponto positivos de detecção de detritos.

5. CONCLUSÃO

O estudo confirma as análise preliminares sobre o comportamento do vento (Berto et al, 2025), além disso a questão da aleatoriedade da informação que consta no pixel leva a condução de uma análise estatística no nosso caso $p=92\%$ podendo ser superior para reduzir ainda mais e assim, reduzir os pixels sem informação e faz-se necessário estudar outras variáveis de natureza meteorológica e oceânica e, evoluir nas metodologias de identificação e caracterização dos detritos flutuantes classificando e definindo novas áreas podendo promover maior impacto no processo de identificação e classificação de detritos, reduzindo.

Financiamento: A presente foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq Brasil, no âmbito do processo 405449/2022-4, "Projeto Oceanos de Plástico: Monitoramento da cadeia produtiva do plástico integrando estratégias de descarte e reciclagem para enfrentamento da poluição." Coordenado pelo Dr. Jessé Marques da Silva Júnior Pavão.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer a Instituição Centro Universitário Cesmac, ao Programa de Pós-Graduação em Análises de Sistemas Ambientais (PPGASA), Ao Projeto Oceanos de Plástico (n. 405449/2022-4) e ao Laboratório de Emergia e Resiliência de Ecossistemas (LERE).

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse

REFERÊNCIAS

1. Berto, Marcio Roberto Santos ; Reis, Marcelo ; Lima, Thyago Anthony Soares ; Soares, Clarissa Nascimento ; Silva, Iago Maurício Dos Santos ; Cavalcanti, Alessandro Sarmento ; Pavão, Jessé Marques . Mapping the seasonality of marine debris waste in a tropical touristic hotspot. JOURNAL OF COASTAL CONSERVATION, v. 29, p. 1-12, 2025.
2. Boletim para Análise e Previsão climática para o estado de Alagoas – SEMARH(<https://www.semarh.al.gov.br/tempo-e-clima/previsao-climatica/previsao-climatica-para-alagoas/category/78-al>)
3. M. M. Duarte and L. Azevedo, "Automatic Detection and Identification of Floating Marine Debris Using Multispectral Satellite Imagery," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 61, pp. 1-15, 2023, Art no. 2002315, doi: 10.1109/TGRS.2023.3283607. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10147236>. Acessado em: 15 de Jul. 2025.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content

Otimização multissensor para detecção de plásticos marinhos: estado da arte de abordagens drone-para-satélite

Marcos Santana dos Santos^{1,4*}, Thyago Anthony Soares Lima^{2,3}, Clarissa Nascimento Soares^{4,5}, Alessandro Sarmiento Cavalcanti

⁴, Marcelo Reis^{4,5} e Jessé Marques Pavão^{4,5}

¹ Graduação em Engenharia Civil, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

² Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), São José dos Campos, SP, Brasil.

³ Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, (Unesp/Cemaden), São José dos Campos, SP, Brasil.

⁴ Laboratório de Emergência e Resiliência de Ecossistemas - LERE, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

⁵ Programa de Pós-Graduação em Análise de Sistemas Ambientais, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

* Correspondência: socram.marcos@outlook.com

Abstract: Remotely detecting floating marine plastic remains a challenge due to factors such as reduced image fractions, spectral confusion with natural elements, and radiometric variability between scenes. This review summarizes the state-of-the-art drone-to-satellite optimization steps that leverage UAV data—fine-grain labels, object morphology, and subpixel fractions—to improve detection performance in satellite imagery. The data were organized into five axes: (i) UAV “satellitization,” (ii) robust water masking and solar reflection correction, (iii) spectral and textural descriptors between indices, (iv) transfer learning and domain adaptation combined with fraction-level image separation, and (v) spatiotemporal postprocessing. Solid evidence indicates that macroplastic patches can be separated from natural materials when reflections are controlled and infrared features are exploited. Object-level metrics better reflect operational value than pixel-only metrics. We identify gaps - standardized ground truth with subpixel fractions, multi-scene evaluation across optical regimes, and reproducible reports of domain adaptation - and propose an agenda centered on probabilistic parameter optimization, uncertainty-driven drone sampling after rainfall events, and coupling with metocean drift forecasts to prioritize monitoring and response.

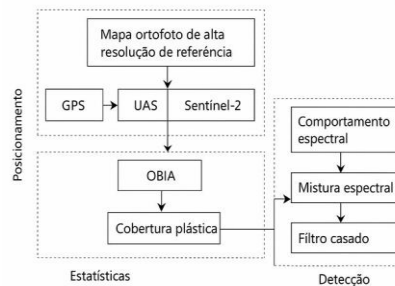
Keywords: marine plastic debris; Sentinel-2; UAV; FDI; sunglint correction; domain adaptation; subpixel unmixing; object-level IoU.

1. INTRODUÇÃO

A presença de detritos plásticos flutuantes no oceano tornou-se um tema central na interface entre ciência, políticas públicas e operações costeiras. No sensoriamento remoto óptico, o desafio é triplo: (i) frações de imagem frequentemente pequenas, (ii) confusão espectral com materiais naturais (algas, espuma marinha, detritos orgânicos) e (iii) variabilidade radiométrica/geométrica entre sensores e cenas (atmosfera, reflexos, ângulos de captura de imagem). Estudos prévios mostraram evidência orbital de manchas de macroplásticos detectáveis e distinguíveis de sargaço em imagens do Satélite Sentinel-2 quando pré-processamentos e descritores e índices adequados são empregados [1, 2]

Esta revisão tem como foco pipelines, i.e. etapas, do processo drone-satélite: como usar dados de drone (rótulos finos, espectros endmember, frações subpixel e contexto morfológico) para otimizar a detecção em dados orbitais (especialmente Sentinel-2). Consideramos nesse trabalho: (i) harmonização radiométrica e MTF/PSF matching para ajustar mosaicos UAV para a perspectiva de satélite; (ii) filtros de água robustos (NDWI/MNDWI/AWEI) e correção de sunglint (reflexo solar); (iii) índices/descriptores (FDI, razões NIR/SWIR, texturas) e diferenciação entre elementos naturais (algas, espuma marinha) e plástico; (iv) aprendizado por transferência e adaptação de domínio (CORAL/DANN) com identificar e quantificar materiais diferentes presentes em cada pixel (unmixing subpixel); (v) métricas por pixel e por objeto (IoU por classe de área) e protocolos de validação multicena. Sínteses e benchmarks recentes, como MARIDA, dão base comparável para algoritmos [3,4], conforme Figura 1.

Figura 1. Estrutura Conceitual.



2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Fundamentos físicos-espectrais relevantes

Plásticos (PE, PP, PET etc.) exibem feições diagnósticas do espectro infravermelho (NIR–SWIR, absorções ~1215, ~1417, ~1732 nm, variações de declividade), moduladas por umidade e biofilme, que os diferenciam de elementos naturais. Bancos de dados espectrais confirmam assinaturas de plásticos secos e molhados do ultravioleta (UV) ao infravermelho de onda curta (SWIR), úteis como limites e para validações realistas [5,6, 7]. Operacionalmente, descritores de próximo ao infravermelho (NIR) altos com infravermelho de onda curta (SWIR) relativamente baixo e contraste em relação ao vermelho tendem a realçar plástico, enquanto algas elevam a borda vermelha, e tanto espuma marinha como areia molhada elevam SWIR. Esses padrões motivam índices como o Índice de Folha Verde (FDI) e razões NIR/SWIR discutidas adiante [1, 8].

2.2 Síntese sistemática

Bases e período: Scopus, Web of Science, IEEE Xplore (2015–2025). Strings (EN/PT): ("marine plastic" OR "floating debris") AND ("remote sensing" OR "Sentinel-2") AND (UAV OR drone) AND (FDI OR "domain adaptation" OR "sunglint").

Critérios de inclusão: (a) validação observacional (drone/campo ou datasets rotulados); (b) foco em detecção (pixel/objeto) com detalhes de pré-processamento e métricas; (c) ênfase em costas/estuários.

Exclusão: trabalhos puramente conceituais sem validação ou sem replicabilidade.

Extrações: sensor, bandas/índices, água/reflexo solar, estratégias drone-satélite (frações subpixel, adaptação de domínio), métrica principal (F1/IoU/PR-AUC), cenário (estuário/costa). Diretrizes PRISMA foram seguidas para transparência dos resultados.

3. RESULTADOS

3.1 Síntese dos índices utilizados

A segmentação de água é alicerce para reduzir falsos positivos em costões/sombra. Índice de diferença normalizado de água (NDWI) [9], Índice de diferença normalizada modificado da água (MNDWI) [10] e Índice de Extração Automatizada de Água (AWEI) [11] são escolhas consagradas, com AWEI robusto sob sombra e superfícies escuras. O reflexo luminoso eleva NIR e pode gerar falsos-positivos de plástico, no entanto, correções simples por regressão NIR~SWIR [12] e revisões de métodos [13] estabilizam limiares por cena e reduzem falsos positivos (Tabela 1).

Tabela 1. Síntese dos índices utilizados.

Referência	Sensibilidade/Observações	Para quê	Fórmula (bandas S2)	Índice / Órgão
Mc Feeters (1996) (Taylor & Francis, Online)	Pode superestimar água em áreas urbanas/turbidíssimas; sensível sunlight.	Delinear água em geral.	$(B3-B8)/(B3+B8)$	NDWI
Xu (2006) (Taylor & Francis, Online)	Ainda pode ser afetado por sunglint e águas muito turvas; limiar depende da cena.	Água em ambientes com fundo urbano/solo exposto; reduz falsos positivos vc NDWI.	$(B3-B11)/(B3+B11)$	MNDWI
Feyisa et al. (2014) (PMC, BioMed Central)	Robusto a superfícies escuras; pode confundir espuma/sunglint intenso.	Extrair água quando sombras não são problema.	$4 \cdot (B3-B11) - (0.25 \cdot B8 + 2.75 \cdot B12)$	AWEI_nsh (sem sombra)
Feyisa et al. (2014) (PMC, Spatial Thoughts, BioMed Central)	Reduz falsos positivos por sombra; ainda sensível a brilho especular.	Extrair água em presença de sombras (montanhas, edifícios, margens).	$(B2 + 2.5 \cdot B3 - 1.5 \cdot (B8 + B11) - 0.25 \cdot B12)$	AWEI_sh (com sombra)
Biermann et al. (2020); revisão com fórmula S2. (PlyMSEA, PMC)	A subtração da linha de base reduz sensibilidade a atmosfera, ângulos de visada e sunglint; ainda exige verificação com NDVI/PI para separar vegetação.	Realçar materiais flutuantes (plásticos, madeira, espuma) sobre a água.	Forma geral: $FDI = Rrs(B7) - R's(B8)$, com $R's(B8) = Rrs(B6) + (Rrs(B11) - Rrs(B6)) \cdot ((\lambda B8 - \lambda B6) / (\lambda B11 - \lambda B6)) \cdot (x10 \text{ no original})$ Prático (S2): $FDI \approx b8 - [B6 + (B11 - B6) \cdot ((\lambda B8 - \lambda B6) / (\lambda B11 - \lambda B6))]$.	Fdi (Floating Debris Index)
Discussões sobre importância de B8 e B11 p/ detecção de macrolástico. Índices. (MDPI)	Não normalizado; sensível a atmosfera e glint; usar com outros índices.	Heurística para destacar objetos com alta refletância no NIR vs água escura no SWIR (triagem rápida).	$B8/B11$	Razão NIR/SWIR
Síntese recente de métodos. (PMC)	Vegetação pode "imitar" plásticos se usada isoladamente; combinar com FDI.	Separar vegetação (alta) de plásticos/água (baixa a negativa); útil em conjunto com FDI.	$(B8 - B4)/(B8+B4)$	(B8-B4)/(B8+B4) (NDVI)

3.1. Índices e descritores para detritos flutuantes

O Índice de Detritos Flutuantes (FDI), proposto para Sentinel-2, explora a posição espectral das faixas de frequência B8 (842 nm) em relação à interpolação entre B6 (740 nm) e B7 (783 nm), elevando contrastes de detritos com alto NIR [1]. Complementarmente, razões infravermelhas (NIR/SWIR, e.g., B8/B11), contrastes (NIR-RED) $[(B8-B4)/(B8+B4)]$, declividade de margem vermelha e texturas 2D auxiliam a dissociação de elementos naturais, sobretudo quando combinadas a morfometria de objeto (elongação, circularidade) e contexto físico (proximidade de foz, marinas, plumas). Evidências de campo e de fusão de satélite e alta resolução reforçam a utilidade desses descritores [8, 14].

3.2. Drone-satélite: harmonização, fração, adaptação e domínio

Para transferir rótulos do drone ao orbital, recomenda-se correção atmosférica para refletância de superfície, desempenho observado do sistema de imagem e reamostragem para 10m, e mapeamento de frações subpixel (plástico por janela 10x10 m) como alvo contínuo no treino do classificador orbital. Estudos de campo/UAS+S2 mostram ganhos consistentes ao usar alvos plásticos controlados e fusão de informação [2, 15]. Como drones (UAV) e Satélites (Sentinel-2) têm distribuições distintas, técnicas de ajustes reduzem a mudança de covariáveis. A programação CORAL alinha estatísticas de segunda ordem entre domínios, e o Alinhamento de Correlação para Adaptação de Domínio Profundo (Deep CORAL) estende ao espaço de ativações em redes profundas [16]. Por fim, o Treinamento Adversarial de Domínio de Redes Neurais (DANN) usa um classificador adversário de domínio com gradiente reverso para forçar invariância de domínio [17]. Essas abordagens são facilmente integráveis a nas etapas de ajustes supervisionados para classes raras usando perda de foco e classes de importância. Com espectros de plásticos virgens, envelhecidos e com biofilme [5, 6], o desembaralhamento esparsos (restrições de soma um e não-negatividade) melhora estimativas de fração plástica por pixel orbital, servindo tanto para treino quanto para validação (Tabela 2).

Tabela 2. As etapas e riscos de harmonização e DA.

Parâmetros-chave	Risco de viés	O que otimiza	Estratégia
Modelo de aerossol (marítimo/continental), VIS/ta, Super/ método (p.ex., Empirical Line vs. radiativo), máscara de sombra, correção de adjacência.	subcorreção por escolha inadequada de modelo de aerossol; espectros do drone comparáveis aos orbitais; sombras residuais; adjacência em cenas reduz variação por aerossol/umidade. costeiras.	Converte DN-reflectância de superfície, tornando comparáveis aos orbitais; reduz variação por aerossol/umidade.	Correção atmosférica (UAV)
Usar L2A (Sen2Cor/MAJA), máscara de nuvem/sombra confiável, normalização opcional.	Misturar L1C e L2A; artefatos de cirrus fina; BRDF BRDF residual.	Harmoniza cenas S2 (entre datas/locais), reduzindo “drift” radiométrico para treino e aplicação.	Correção atmosférica (S2)
Kernel por banda (σ /PSF), janela do filtro, validação via função de modulação contraste.	Kernel incorreto gera espectros/texturas irreais; “fantasmas” de borda.	Faz o mosaic UAV “parecer” a nitidez do S2 (degrada resolução efetiva), evitando overfitting a detalhes ausentes no orbital.	MTF/PSF matching
Método (bilinear/bicúbico/box), GSD alvo (10m), ordem: MTF – reamostragem .	Suavização excessiva (perda de sinal), Aliasing se o mosaic não estiver filtrado (precisa do MTF/PSF antes).	Alinha GSD ao S2 (20M), permitindo criar rótulos/frações compatíveis com o pixel orbital.	Reamostragem (UAV – 10m)
Tamanho de janela (10x10m), regra de agregação(media/mediana), limiar de pureza para objetos e classe “pura”.	Janela mal definida cria leakage (contorna objetos) e viés em borda; rótulos “duros” fingindo pureza.	Rotula cada pixel S2 com f plástico (0-1), melhorando aprendizado para alvos menores que o pixel.	Frações subpixel (a partir do UAV)
Pesa da perda CORAL (λ), camadas onde alinhar (pré/pós-feature), normalização por lote.	Sobreajuste ao domínio de origem; alinhamento excessivo “aplane” diferenças úteis.	Alinha covariâncias UAV $\leftrightarrow$ s2, reduzindo covariante shift sem rótulos do alvo.	Adaptação de domínio - CORAL
λ (loss), taxa de aprendizado, camadas com penalização, early stopping.	Instabilidade se λ muito alto; degrada classe rara.	Versão profunda do CORAL: aprende representações invariantes de domínio.	Adaptação de domínio – Deep-CORAL
Peso do adversário (λ), taxa de aprendizado (tarefa vs. domínio), schedule de λ , batch fonte/alvo.	Colapso de classe se o adversário dominar; mix requer balancear fonte/alvo.	Invariância por treinamento adversarial (classificador de domínio + gradient reversal).	Adaptação de domínio – DANN
Conjunto de endmembers reais (PE/PP molhado, envelhecido), restrições (NNLS, soma-um), peso L1 (α), regularização espacial opcional (TV/CRF).	Endmembers não representativos (plástico seco vs. molhado, biofilme); violação soma-um.	Estima frações (água/espuma/algas/ plástico) por pixel S2; útil como alvo e como post-hoc de qualidade.	Unmixing subpixel (esparso)

3.3. Avaliação: métricas, benchmarks e protocolos

Além de Precisão/Recall/F1 e Área sob a curva de Precisão-Recall (PR-AUC) por pixel, recomendamos divisão em sub-regiões estratificadas por área (e.g., >25, >50, >100 m²) para aproximar a utilidade operacional (p. ex., priorização de limpeza). O MARIDA (Sentinel-2) oferece 15 classes temáticas (detrito, densidade de algas, espuma marinha, tipos de água, nuvens), anotações georreferenciadas e divisões treino, validação e teste, sendo referência para comparar algoritmos [3]. Trabalhos recentes exploram aprendizado supervisionado em larga escala e mapeamento de densidade de detritos [4]. Validações devem ser estratificadas por regime óptico (turbidez/vento), geometria solar, sensor e ambiente (estuário vs. costa aberta), com cenas fixas por região para medir generalização. Essa prática reduz o otimismo local e captura casos extremos (pós-chuva, forte maré, ressaca). As etapas de ajuste entre drone e satélite (FDI+DA+CRF) eleva a recolecção de dados mantendo precisão, sobretudo em estuários. Exemplos reais de detecção de detritos após eventos de chuva e validação com drones podem ser ilustrados com realces de FDI, as detecções e a validação por drone, com divisão em sub-regiões estratificadas por área por objeto (Figura 3).

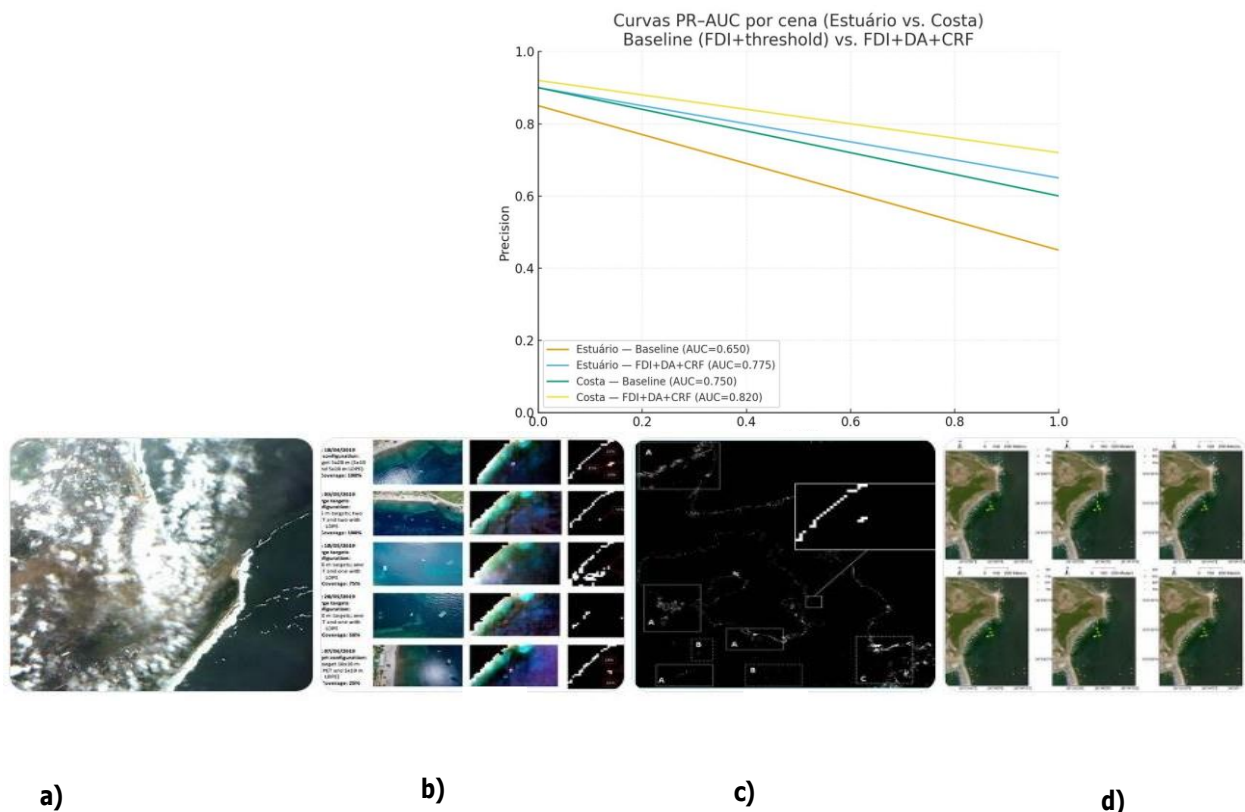


Figura 3. Pipeline drone-satélite. (a) Cena Sentinel-2 com anotações de detritos após as cheias de abril/2019 no estuário/porto de Durban (África do Sul). (b) Experimento drone-satélite com alvos plásticos: mosaico UAV, subcenas S2 e resultado de matched filtering. (c) Produto Sentinel-2 completo com detecções e exemplos de falsos positivos (A: bordas de nuvem/sombra; B: embarcações/esteiras; C: sunglint intenso). (d) Validação por grades/"polígonos" com TP/TN/FP/FN em Mytilene (Grécia), a partir de observações in situ/UAV.

4. DISCUSSÃO

4.1 Achados Consolidados, Boas Práticas, Lacunas e Agenda De Pesquisa

A detectabilidade orbital é possível, mas depende de água segmentada + reflexo solar corrigido + descritores dos índices de água e detritos flutuantes [1, 2]; A Fusão e alta resolução ampliam detecção de manchas menores [14]. Além disso, rótulos de drone (frações/objetos) associados à redes neurais aumentam a transferência entre sensores. Resultados positivos reais melhoram a dissociação e reduzem falsos positivos com elementos naturais [5]. Imagens de terreno padronizadas com frações subpixel e casos de incerteza, bem como protocolos de avaliação com estratificação óptica e meteórico-oceânica - ainda são pouco reportados. Além disso, relatos reprodutíveis de domínio de redes neurais e curriculum por regime são raros. Por fim, a integração com previsão de deriva e amostragem ativa por incerteza para otimizar amostragens de drones e capturas de satélite. Métricas por objeto reportadas de forma sistemática (IoU por faixas de área; tempo até o pico pós-chuva).

4.2 Índices e observações

A evidência converge para um ponto: não existe solução de "um único índice"; o desempenho vem de pipelines que combinam água robusta + reflexão solar corrigida + descritores infravermelhos e textura + aprendizado com redes neurais + pós-processamento espacial [1, 15]. O FDI é necessário, porém insuficiente quando usado isoladamente; sua ancoragem em razões NIR/SWIR e morfometria reduz confusão com sargaço/espuma [2, 14]. DA mostra ganhos marginais maiores em estuários com alta turbidez, onde recalibrar thresholds a cada cena não basta [16, 17]. Há trade-offs: correções lineares de sunglint podem supercorrigir em gradientes de CDOM/sedimento; espectros de plásticos envelhecidos/com biofilme aproximam-se de materiais naturais, exigindo endmembers atualizados e unmixing esparsos [5, 6]. Em generalização geográfica, modelos treinados em estuários pós-chuva transferem pior para

costa aberta oligotrófica; o curriculum por regime (do cenário com melhor SNR ao mais desafiador) e otimização bayesiana de hiperparâmetros por cena-alvo aparecem como caminhos promissores [3, 4].

5. CONCLUSÃO

Consolidamos um pipeline otimizado para o elo drone-satélite na detecção de detritos plásticos marinhos: (i) água (NDWI/MNDWI/AWEI) + (ii) sunglint (Hedley/Kay) + (iii) descritores (FDI, razões NIR–SWIR, textura/morfologia) + (iv) transferência/adaptação de domínio apoiada em frações subpixel + (v) pós-processamento espacial/temporal. Essa combinação, quando avaliada em benchmarks (MARIDA) e cenários reais (estuário/costa), reduz falsos positivos e aumenta a operacionalidade para monitoramento e resposta costeira [1, 3].

Financiamento: A presente pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq Brasil, no âmbito do processo 405449/2022-4, “Projeto Oceanos de Plástico: Monitoramento da cadeia produtiva do plástico integrando estratégias de descarte e reciclagem para enfrentamento da poluição.” Coordenado pelo Dr. Jessé Marques Pavão.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer a Instituição Centro Universitário Cesmac, ao Programa de Pós-Graduação em Análises de Sistemas Ambientais (PPGASA), Ao Projeto Oceanos de Plástico (n. 405449/2022-4) e ao Laboratório de Emergia e Resiliência de Ecossistemas (LERE).

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

REFERÊNCIAS

1. Biermann, L., Clewley, D., Martinez-Vicente, V., & Topouzelis, K. Finding Plastic Patches in Coastal Waters using Optical Satellite Data. *Scientific Reports* **2020**, 10, 5364. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62298-z>
2. Themistocleous, K., Papoutsas, C., Michaelides, S., & Hadjimitsis, D. Investigating Detection of Floating Plastic Litter from Space Using Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing* **2020**, 12(16), 2648. <https://doi.org/10.3390/rs12162648>
3. Kikaki, K., Kakogeorgiou, I., Mikeli, P., Raitsos, D. E., & Karantzalos, K. MARIDA: A benchmark for Marine Debris detection from Sentinel-2 remote sensing data. *Plos one* **2022**, 17(1), e0262247. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262247>
- Rußwurm, M., Venkatesa, S. J., & Tuia, D. Large-scale detection of marine debris in coastal areas with Sentinel-2. *Iscience* **2023**, 26(12). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108402>
4. Garaba, S. P., & Dierssen, H. M. Hyperspectral ultraviolet to shortwave infrared characteristics of marine-harvested, washed-ashore and virgin plastics. *Earth System Science Data* **2020**, 12(1), 77-86. <https://doi.org/10.5194/essd-12-77-2020>
5. Garaba, S. P., & Dierssen, H. M. An airborne remote sensing case study of synthetic hydrocarbon detection using short wave infrared absorption features identified from marine-harvested macro-and microplastics. *Remote Sensing of Environment* **2018**, 205, 224-235. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.023>
6. Moshtaghi, M., Knaeps, E., Sterckx, S., Garaba, S., & Meire, D. Spectral reflectance of marine macroplastics in the VNIR and SWIR measured in a controlled environment. *Scientific Reports* **2021**, 11(1), 5436. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84867-6>
7. Martínez-Vicente, V., et al. Measuring Marine Plastic Debris from Space: Initial Assessment of Observation Requirements. *Remote Sensing* **2019**, 11(20), 2443. <https://doi.org/10.3390/rs11202443>
8. McFeeters, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* **1996**, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
9. Xu, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* **2006**, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
10. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote sensing of environment* **2014**, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
11. Hedley, J. D., Harborne, A. R., & Mumby, P. J. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing* **2005**, 26(10), 2107-2112. <https://doi.org/10.1080/01431160500034086>
12. Kay, S., Hedley, J., & Lavender, S. Sun glint correction of aquatic scenes: a review. *Remote Sensing* **2009**, 1(4), 697-730. <https://doi.org/10.3390/rs1040697>
13. Kremezi, M., et al. Increasing the Sentinel-2 potential for marine plastic litter monitoring through image fusion techniques. *Marine Pollution Bulletin* **2022**, 182, 113974. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113974>
14. Topouzelis, K., Papageorgiou, D., Suaria, G., & Aliani, S. Floating marine litter detection algorithms and techniques using optical remote sensing data: A review. *Marine Pollution Bulletin* **2021**, 170, 112675. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112675>
15. Sun, B., Saenko, K. Deep CORAL: Correlation Alignment for Deep Domain Adaptation. In: Hua, G., Jégou, H. (eds) Computer Vision – ECCV 2016 Workshops. ECCV 2016. *Lecture Notes in Computer Science* **2016**, vol 9915. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49409-8_35
16. Ganin, Y., et al. Domain-Adversarial Training of Neural Networks (DANN). *Journal of Machine Learning Research* **2016**, 17(59), 1-35. <http://jmlr.org/papers/v17/15-239.html>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Casca do Coco e Polímeros Plásticos: Resultados Preliminares

Victoria Kamille de Castro Almeida^{1,2*}, Clarissa Nascimento Soares^{1,2}, Maria Fernanda Torres dos Santos^{2,3}, Alessandro Sarmento Cavalcanti^{1,2}, Marcelo Reis^{1,2} e Jessé Marques da Silva Júnior Pavão^{1,2}

¹ Programa de Pós-Graduação em Análises de Sistemas Ambientais, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

² Laboratório de Energia e Resiliência de Ecossistemas - LERE, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

³ Graduanda em Design, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

* Correspondence: victoriakamilleca@gmail.com

Abstract: The increase in the consumption of plastics and cement caused by growing population needs has intensified environmental impacts, affecting the marine environment with pollution and the atmosphere with greenhouse gas emissions and polluting particles. In the context, the present study aims to evaluate the efficiency of partially replacing cement with coconut shell fiber powder and natural aggregates with recycled plastic polymers in the development of sustainable concrete. During the analyses, the following factors were taken into account: breaking time and percentages of 5%, 10% and 15% of organic material, whose preliminary results showed the need for adjustments in the water/cement factor to ensure better mechanical performance and durability. The mixture with 5% powder stood out for its good performance in compressive and tensile strength. As for specific mass, it was possible to observe a slight increase in porosity in relation to the reference, but with satisfactory results in water absorption and void index. With this, it was determined that the substitute materials have good technical and environmental potential, contributing to the reduction of irregular disposal, environmental degradation, and air pollution.

Keywords: Marine pollution, Recycled plastic polymers, Organic materials, Illegal dumping, Reduction of greenhouse gas emissions.

1. INTRODUÇÃO

À medida em que os anos passam e a população se desenvolve, cresce o consumo de produtos industrializados, e um deles é o plástico de uso único, que tem gerado impactos ambientais devido ao seu descarte inadequado e a sua difícil decomposição [1]. Segundo os dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente citado pela Un Environment Programme (UNEP) cerca de 85% dos resíduos presentes nos oceanos são plásticos, os quais, ao se degradarem liberam micro e nanoplásticos que afetam os ecossistemas marinhos e terrestres, representando assim, um risco à saúde dos seres presentes nos meios [2]. Simultaneamente, a indústria da construção civil também contribui, severamente, para a degradação ambiental, principalmente pelo uso elevado do cimento, cuja produção emite altas quantidades de gases de efeito estufa, e consome energia de forma exacerbada durante a confecção do clínquer (principal componente do cimento Portland) [3 e 4].

Pensando nos problemas apresentados acima, é visível a necessidade do desenvolvimento de uma alternativa sustentável que contribua com a mitigação dos impactos ambientais associados tanto ao plástico quanto ao cimento. Logo, o presente estudo visa o desenvolvimento de um concreto sustentável a partir da substituição parcial do cimento pelo pó da fibra da casca do coco, matéria orgânica abundante nas regiões Norte e Nordeste devido ao clima, e dos agregados naturais (brita e areia) por polímeros plásticos reciclados (PET e EPS) [5]. A proposta incorpora o reaproveitamento de resíduos exuberantes na região evitando o seu descarte incorreto, a contaminação do solo e a proliferação de vetores; auxiliando na redução das emissões de gases de efeito estufa e das mudanças climáticas, promovendo destinações mais adequadas e contribuindo para a inovação na indústria da construção civil e alimentícia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto corresponde a um estudo de caso descritivo e experimental desenvolvido a partir de pesquisas bibliográficas (Google acadêmico, Scielo e Periódicos Capes) realizadas no Laboratório de Emergência e Resiliência de Ecossistemas (LERE), localizado no Campus IV do Centro Universitário Cesmac; e testes laboratoriais desenvolvidos no laboratório do Núcleo de Ciências Exatas e Tecnológicas Cesmac.

2.1 Desenvolvimento da fase inicial dos testes laboratoriais

A metodologia seguiu os experimentos de Feitosa Júnior [6], substituindo os tipos plásticos PP e PS por PET, previamente coletado por catadores cadastrados pela Startup Policoncret. Após o recolhimento, os materiais foram higienizados, separados por tipos e triturados no moinho triturador com capacidade de 200-250kg (Figuras 1 e 2). Toda essa fase foi realizada em conjunto com o Projeto Oceanos de Plástico do Cesmac, e com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).



Figura 1- Separação dos tipos de polímeros



Figura 2 – PET sendo secado.

A areia e a brita utilizadas foram escolhidas devido a sua adequação para acabamentos e facilidade de manuseio. Já o cimento Portland CPV-ARI 40-RS, possui alta resistência inicial, menor quantidade de filler, alto grau de finura, secagem rápida e maior resistência à compressão final, tornando-o ideal para a confecção de elementos pré-moldados [7].

O estudo teve como intuito avaliar a eficiência de concretos com diferentes proporções de pó da fibra da casca do coco, através de ensaios de massa específica, índice de vazios, absorção de água por imersão, resistência à tração e a compressão que foram avaliados de acordo com as suas normas NBR 9778/2009, NBR 6118/2004 e a NBR 7215/1996 [8, 9 e 10]. E para cada tipo de concreto experimentado, foram produzidos 16 corpos de provas que foram rompidos aos 7, 14, 21 e 28 dias correspondente aos dias de cura, totalizando em 48 amostras, que foram preparadas conforme a NBR 5738/2015 (determina os procedimentos para a moldagem e a cura das amostras) [11], e rompidos no laboratório da empresa Tecnosenge-Tecnologia e serviços de engenharia.

Com isso, foram utilizados, como referências, o concreto convencional (brita, areia, cimento e água) (CC)- usado como base nos estudos de Feitosa Júnior, e o concreto com os polímeros (CP)- desenvolvido por Feitosa Júnior e utilizado nos estudos de Pacheco [12] (brita, areia, cimento, água, PET e EPS). Assim como foram desenvolvidos 3 com os polímeros reciclados e o material orgânico (CCP), contendo 5%, 10% e 15% do pó na composição (como pode ser observado na Tabela 1).

Anteriormente a produção dos testes, foi feita a obtenção do pó da fibra da casca do coco através da Cooperativa Pindorama, o qual faz o uso de 100% dos seus materiais orgânicos produzidos através de sua extensa variedade de produtos, que forneceu 38kg do material em formato de pó, fazendo com que a única forma de higienização fosse a secagem ao sol [13].

Tabela 1: Quantidade de materiais presentes em cada concreto.

Concretos	Aglomerantes		Agregados miúdos		Agregados graúdos		Água
	Cimento	Pó da fibra	Areia	PET	Brita	EPS	
CC ¹	13.500	-	28.290*	1.168	30.00***	0.013	6.710
CP ²	13.500	-	25.461**	1.168	28.500****	0.013	6.710
CPP ³ 5%	12.825	0.261	25.461**	1.168	28.500****	0.013	6.710
CPP 10%	12.150	0.522	25.461	1.168	28.500	0.013	6.710
CPP 15%	11.475	0.784	25.461	1.168	28.500	0.013	6.710

*Areia média lavada

** Areia fina lavada

*** Brita ¾

**** Brita 0

¹ Concreto convencional

² Concreto com polímeros reciclados

³ Concreto com polímeros e o pó da fibra da casca do coco

Feita a captação do material, foi realizado o ensaio de granulometria, mediante a NBR NM 248/2001 [14] e as recomendações de Lemos e Fredenberg [15], que estabelecem o limite de 10mm para o pó da fibra, pois complicaria o processo de distribuição uniforme do material no concreto. E para isso utilizou-se um peneirador eletromagnético e balança semianalítica para a análise dos materiais. Também foi avaliado o teor de umidade dos materiais segundo a NBR 6457/2016, com o auxílio de uma estufa e de uma balança com capacidade máxima de 30kg, onde foi possível obter os valores da massa seca para que assim fosse calculado o teor.

2.1 Confeção dos concretos

Inicialmente, os materiais foram separados e pesados em balanças adequadas à sua massa, e misturados em um betoneira com capacidade de 400L seguindo a ordem do concreto convencional, sendo feito somente algumas adaptações para inserção dos materiais substitutos. Em seguida, realizou-se o teste de slump de acordo com a NBR 67/1998 [16], que declara a consistência correta do concreto determinando se possui trabalhabilidade e a recomendação da destinação do seu uso. Posteriormente, os corpos de prova foram moldados [13], desmoldados após 24 horas, identificados e transportados até o laboratório da Tecnosenge, onde permanece-ram até as idades de rompimento (Figuras 3 e 4).



Figura 3- Materiais já separados



Figura 4- Corpos de prova já desmoldados

2.2 Execução dos ensaios normativos

Para analisar a eficiência do produto em estudo, após o seu desmolde, foram realizados mais alguns ensaios como o de resistência à compressão (determina se o concreto aguenta altas cargas ou não, definindo se pode ser considerado estrutural ou não estrutural), resistência à tração (estabelece quais são os procedimentos realizados em um projeto de estrutura de concreto), absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica (avaliará as propriedades físicas do material e o seu desempenho) [10, 8 e 9].

Foi determinado que o teste à tração seria realizado a partir dos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão, ou seja, a partir de um cálculo (1) que obterá a média. Assim como foi realizado uma adaptação no ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica, onde o resultado da massa imersa também seria realizado a partir de um cálculo que leva em consideração o valor do empuxo e do volume da amostra (2, 3, 4, 5 e 6) (Figuras 5 e 6).

$$f_{ctm} = 0,30 * f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

$$E = m_{sat} - d(\acute{a}gua) * v \quad (2)$$

$$M_i = m_{sat} - e \quad (3)$$

$$\frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (4)$$

$$\frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad (5)$$

$$\frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (6)$$

Onde,

F_{ctm}: Resistência média à tração;

F_{ck}: Resultado da resistência à compressão em MPa;

E: Empuxo;

M_{sat}: Massa saturada;

d: Densidade;

M_i: Massa imersa;

M_s: Massa seca.



Figura 5- Amostras postas na estufa



Figura 6- Amostras em processo de ebulição

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Durante os testes de granulometria, foi possível identificar que a dimensão dos grãos do pó da fibra é 3, 57mm, estando dentro dos limites de 10mm [15]. Assim como no desenvolvimento dos experimentos, foram perceptíveis a necessidade do acréscimo de mais água após a colocação do pó, cimento e o restante da quantidade inicialmente separada da água, fazendo com que o fator água/cimento inicial, 0,55, fosse alterado. No traço contendo 5%, foram acrescentados mais 1kg (a/c: 0,60); no contendo 10%, mais 1,5kg, (a/c: 0,67); Já o com 15%, foi acrescentado mais 1kg, (a/c: 0,63). Como o objetivo da pesquisa é desenvolver um concreto sustentável não estrutural, ou seja, que não tem como função suportar cargas muito altas, como um estrutural, não foi determinado em norma, um valor fixo. Logo, foi determinado que o fator limite seria 0,67, pois está dentro da faixa específica que garante as boas propriedades do concreto.

3.1. Análise de resistência à tração e compressão

Após a execução dos ensaios de resistência à compressão, foi possível observar que ambos os experimentos apresentaram resultados positivos e próximos ao de referência, sendo o único mais baixo, 18,23 MPa proveniente do CPP 5%. Resultado apresentado na Tabela 2. Porém, sendo apto para fins não estruturais. Especificação essa que somente o concreto com 10% do material orgânico alcançou [17]. Já a resistência à tração apresentou resultados aproximados às referências, sendo em até 30,20% ao ser comparado com o convencional (CC) e 17,7% com o concreto com os polímeros (valores referentes ao CPP 10%).

Tabela 2: Resultados dos ensaios de resistência à tração e à compressão.

Concretos	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
CC	99.88	194.26	2.98	19.01
CP	100.23	194.60	2.53	19.7
CPP5%	100.76	194.96	2.98	18.3
CPP 10%	100.98	195.13	2.30	20.2
CPP 15%	101.03	195.22	2.33	21.7

Durante a análise de massa específica (Tabela 3), foi possível observar que houve diferença entre os dados obtidos e os de referência, havendo uma variação entre 1.720 kg/dm³ (seca) e 2.365kg/dm³ (real). Já na saturada, houve um maior desequilíbrio, onde o menor resultado foi 2.041kg/dm³ proveniente do CPP15%. Tais variações afetam a porosidade e a densidade do produto testado, logo, afetando a sua durabilidade e as suas propriedades mecânicas. Pois quanto maior for a porosidade, menor será a sua resistência e absorção de água, favorecendo a rápida degradação e a perda de desempenho.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios realizados nas amostras com 28 dias

Concretos	Massa (g)			Massa específica (kg/dm ³)			Volume real (cm ³)	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
	Seca	Imersa	Saturada	Seca Saturada	Real	Real			
CC	3313	2009	3567	2.127	2.869	2.540	1.558	7.660	16.270
CP	3307	2023	3579	2.126	2.300	2.578	1.556	8.230	17.510
CPP 5%	3149	1570	3387	1.733	1.923	1.995	1.776	7.581	15.202
CPP 10%	3425	1572	3403	1.871	1.859	1.849	1.603	1.092	2.376
CPP 15%	3089	1575	3371	1.720	1.877	2.041	1.817	9.151	15.731

Na análise de absorção de água por imersão houve uma maior variação, onde o menor foi apresentado pelo CPP 10% (1.092%) e o maior pelo CPP 5% (9.151%), estando esse superior ao resultado do concreto convencional (7.660%) e do concreto contendo os polímeros (8.230%),

ambos de referência. Porém, como já informado no parágrafo anterior, quanto maior for a absorção, maior a degradação e a redução do desempenho. Logo, o CPP 10% apresentou um resultado que garante a sua qualidade, consoante ao que foi observado por Oliveira, Gerin, Reis e Nadin [18] que, para garantir a boa eficiência do concreto, ele precisa absorver até 7% de água.

Já em relação ao índice de vazios, foi notado que os experimentos apresentaram percentuais menores aos de referência, sendo o CPP 10% o de menor valor, 2.376%. Contudo, quanto maior for o índice de vazios, mais alto é a porosidade, maior a permeabilidade, menor a durabilidade e menor a resistência. O percentual apresentado pelos concretos tradicionais varia de 10-15% [19].

4. DISCUSSÕES

A partir dos resultados preliminares apresentados, foi possível perceber que o acréscimo de água e a mudança do fator água/cimento foram necessários para a melhoria da resistência e durabilidade do concreto. Como foi possível perceber, o CPP 10% e o CPP 15% conseguiram alcançar a classificação de concreto estrutural, conforme a NBR 8953:2015 [17], ficando na classe 20 (C20). Já os outros alcançaram resultados que o classificam para fins não estruturais.

Em relação à tração, o único experimento que manifestou uma maior aproximação com os de referência foi o CPP 5%, tornando-o assim um destaque, já que também apresentou bons resultados no ensaio de resistência à compressão.

Nos ensaios da massa específica, foi perceptível que houve uma pequena variação nos dados, indicando um aumento na porosidade dos concretos testados, ao serem comparados com o concreto convencional e com os polímeros. Tendo o CPP15% com o menor resultado no estado seco. Porém, o CPP 10% também mostrou um bom desempenho, na massa real, índice de vazios e absorção de água por imersão, conciliando o bom desempenho mecânico, resistência satisfatória e a menor porosidade, garantindo assim, a aplicabilidade do pó da fibra da casca do coco e dos polímeros plásticos reciclados no desenvolvimento do concreto sustentável não estrutural.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados preliminares obtidos nos ensaios executados, foi possível determinar que a substituição parcial dos materiais convencionais (cimento, areia e brita) por pó da fibra da casca do coco e polímeros plásticos reciclados apresenta viabilidade na produção do concreto sustentável, principalmente para fins não estruturais. Assim como foi possível observar que a alteração do fator água/cimento foi necessária para garantir uma boa trabalhabilidade e um bom desempenho do material produzido.

Entre os experimentos avaliados, o CPP 10% destacou-se por apresentar resultados superiores aos outros experimentos, ao conciliar boa resistência, menores índices de vazios e de absorção de água e boa estabilidade na massa específica, garantindo assim, uma adequada durabilidade e desempenho mecânico. Tal qual o CPP 10%, o CPP 15% exibiu valores que o qualificam

como um concreto estrutural, segundo a NBR 8953: 2015 [17], porém com uma maior variação nas propriedades físicas. Já o CPP 5% alcançou uma maior proximidade com os valores dos concretos de referências no teste de resistência à tração.

Logo, o estudo comprova a eficiência e a viabilidade do reaproveitamento de resíduos orgânicos e inorgânicos na confecção de concretos mais sustentáveis, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais, emissão de gases de efeito estufa e para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis viáveis para as indústrias da construção civil e alimentícias.

Financiamento: A presente foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq Brasil, no âmbito do processo 405449/2022-4, "Projeto Oceanos de Plástico: Monitoramento da cadeia produtiva do plástico integrando estratégias de descarte e reciclagem para enfrentamento da poluição." Coordenado pelo Dr. Jessé Marques da Silva Júnior Pavão.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer a Instituição Centro Universitário Cesmac, ao Programa de Pós-Graduação em Análises de Sistemas Ambientais (PPGASA), ao Projeto Oceanos de Plástico (n. 184 405449/2022-4) e ao Laboratório de Energia e Resiliência de Ecossistemas (LERE).

Conflitos de Interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

REFERÊNCIAS

1. Moreira, T. O que é o plástico biodegradável e sua importância. **eCycle**. 2024, Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/plastico-bio-degradavel/>. (Acesso em: 05 mai. 2025).
2. UNEP. From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution. **UNEP**. 2021, Disponível em: <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>. (Acesso em: 05 mai. 2025).
3. Silva, B. P.; Reiner, G. A exposição da sílica ao trabalhador da construção civil no processo de fabricação da argamassa. *Grupo Fasipecional*. 2020. Disponível em: <https://repositorio.fasipec.com.br/items/a7699588-f5da-45f2-bcd7-277080f6db4f/full>. (Acesso em: 02 mai. 2024).
4. Costa, E. B.; Nobre, T.R.S.; Guerreiro, A. Q.; Mancio, M.; Kirchheim, A.P. Clínter Portland com reduzido impacto ambiental. *Ambiente Construído*, **2013**, v. 13 (2), pp. 75-86. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200007>
5. Cuenca, M. A. G.; Martins, C. R.; Jesus Júnior, L. A. Estatística de produção. **Embrapa**, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agen-cia-de-informacao-tecnologica/cultivos/coco/pre-producao/importancia-socioeconomica/estatistica-da-producao#:~:text=Den-tre%20os%20maiores%20estados,da%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20coco%20nacional>. (Acesso em: 20 ago. 2024)
6. Feitosa Júnior, E. A. Análise da incorporação de materiais poliméricos em concretos: uma alternativa para a diminuição do aporte de plásticos no ambiente. Dissertação (Mestrado em Análise de Sistemas Ambientais), Centro Universitário Cesmac, Maceió, 2019
7. Pugliesi, N. Cimento: Diferentes tipos e aplicações. *Associação Brasileira de Cimento Portland*, São Paulo, **2018**. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>. (Acesso em: 14 nov. 2024).
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778 (2009). *Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 (2014). *Projeto de estruturas de concreto- Procedimentos*. Rio de Janeiro: ABNT.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 (2019). *Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 (2015). *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: ABNT.
12. Pacheco, R. L.; Soares, C. N.; de Santana, R. S. P.; dos Santos, A. F.; de Santana, M. S. A.; & Pavão, J. M. D. S. J. Polymer aggregate as a sustainable alternative for concrete production. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, **2025**, 19(3), pp.1-22. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n3-100>
13. Capelin, L. J.; Moraes, K. K.; Zampieri, J.P.; Vanderlei, R. D. Avaliação dos efeitos da fibra do coco e da microcelulose cristalina nas propriedades de argamassas cimentícias. *Revista Matéria*, **2020**, v. 25 (01). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0876>.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 (2003). *Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT.
15. Lemos, A.M.; Frendenberg, F. C. Estudo da utilização de fibra de coco em vigas de concreto. *Sustenere*, **2019**, 7(2), pp. 01-08. <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2019.002.0001>.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 67(1998). *Concreto- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro: ABNT.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8953(2015). *Concreto para fins estruturais- Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro: ABNT.
18. Oliveira, T. M.; Gerin, M. T.; Reis, A. M.; Nadin, S. Absorção de água e massa específica de agregados graúdos e miúdos de resíduos de concreto. *3º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade (3ºConReSol)*. **2020**. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2020/VII-009.pdf>. (Acesso em: 19 ago. 2025).
19. Araújo, A. E.V.; Gomes, C. R. F.; Neto Mello, G. B.; Pina, A. P.; Nunes, A. M.; Júnior Siqueira, C. R.; Costa, J. G.; Santos, A. F.; Pavão, J. M. S. J. Análise sustentável da substituição da areia natural por resíduos de pedreira nos concretos de cimento Portland. *Educação Ambiental em ação*, **2019**, XVII (66). Disponível em: <http://revistaea.org/artigo.php?idartigo=3533>. (Acesso em: 10 jun. 2024)

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Impressão 3D e Sustentabilidade: Desenvolvimento de Moldes para Cobogós em Concreto com Polímeros Reciclados Inspirados no Filé Alagoano

Maria Fernanda Torres dos Santos^{1,2*}, Fernando de Carvalho Pedroza Júnior⁴, Victoria Kamille de Castro Almeida^{2,3}, Clarissa Nascimento Soares^{2,3}, Alessandro Sarmiento Cavalcanti^{2,3} e Jessé Marques da Silva Júnior Pavão^{2,3}

1 Graduada em Design, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

2 Laboratório de Emergência e Resiliência de Ecossistemas - LERE, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

3 Programa de Pós-Graduação em Análises de Sistemas Ambientais, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

4 Centro de Inovação e Tecnologia, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brasil.

* Correspondência: mftorressantos@gmail.com

Abstract: The article presents the experience of developing cobogó molds through 3D modeling, carried out by the Alagoas startup Policoncret, in the partnership with the CESMAC Technological Innovation Center. The study explores the historical relevance of cobogó as a Brazilian architectural element and highlights Policoncret's innovation in transforming recycled plastic waste into sustainable concrete artifacts. The digital prototyping process is discussed as a strategy to increase design freedom, reduce die costs and accelerate the development of new parts. The analysis points out that the integration between 3D modeling and recycled materials paves the way for a more sustainable and innovative future in construction.

Keywords: Cobogó; 3D modeling; Prototypes; Sustainable Concrete; Policoncret.

1. INTRODUÇÃO

Os desafios ambientais e sociais relacionados ao descarte inadequado de resíduos plásticos vêm impulsionando a busca por soluções inovadoras na construção civil [1]. Paralelamente, a indústria avança em direção ao paradigma da Construção 4.0, caracterizado pela digitalização de processos e pela adoção de tecnologias disruptivas como a impressão 3D e impressão 3D em concreto (3DCP). A impressão 3D consiste na materialização física de um objeto virtual, que pode ser gerado via softwares de CAD (Computer Aided Design – Desenho Assistido por Computador), por exemplo SolidWorks®, e deste projeto desenvolvido via software pode ser extraído um arquivo, normalmente na extensão STL (Stereolithography – Standard Tessellation Language), o qual é aberto em um software de fatiamento ou programação da impressão, onde podem ser definidos parâmetros baseados na tecnologia disponível no equipamento de impressão 3D [2,3 e 4].

Nesse contexto, o presente artigo apresenta o desenvolvimento de cobogós, elementos vazados icônicos que foram inspirados no muxarabi árabe e tornaram-se símbolos do modernismo brasileiro. Seu valor reside tanto na funcionalidade; ventilação e iluminação natural; quanto na estética, marcada pelo jogo de luz e sombra. Hoje, retomam protagonismo em projetos sustentáveis e de design contemporâneo, utilizando materiais sustentáveis e tecnologias digitais [5 e 6]. O estudo se concentra na experiência da startup Policoncret, que utiliza os resíduos plásticos coletados na região litorânea adjacente, nos mares, oceanos e lagunas de Alagoas, como substitutos parciais dos agregados naturais (brita e areia) na confecção de artefatos de concreto não-estrutural [7].

O objetivo foi analisar como a inovação em materiais e a modelagem digital podem contribuir para redefinir parte do setor construtivo, conciliando e respeitando: tradição, sustentabilidade e novos métodos de produção.

Nesse sentido, foi realizada a impressão tridimensional do molde do cobogó pertencente à coleção EcoFios da Arte, inspirada no bordado filé e nas tradições ribeirinhas das lagoas Mundaú e Manguaba, desenvolvida pela startup Policoncret a partir de sua formulação de concreto sustentável com resíduos plásticos reciclados. Essa iniciativa reforça a possibilidade de integração entre tradição estética, inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental, configurando-se como um exemplo concreto de aplicação dos princípios da Construção 4.0 no cenário brasileiro contemporâneo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo fundamentou-se, inicialmente, em uma pesquisa bibliográfica, realizada a partir de artigos científicos, dissertações, jornais e revistas disponíveis em bases digitais como Google Acadêmico, Scielo e Periódicos Capes. Buscando reunir referências sobre a história e a evolução dos cobogós, os métodos tradicionais de produção, suas aplicações arquitetônicas ao longo do tempo, bem como os fundamentos e avanços relacionados à tecnologia de impressão 3D aplicada à construção civil.

Como etapa complementar, foi desenvolvido um estudo de caso envolvendo a análise documental e técnica da startup Policoncret, com foco no processo de fabricação dos cobogós sustentáveis e em sua formulação patenteada de concreto que incorpora resíduos plásticos reciclados. Essa investigação permitiu compreender as particularidades do material utilizado pela empresa, bem como suas vantagens ambientais e tecnológicas em relação às práticas convencionais.

As atividades produzidas durante essa etapa foram realizadas em sua maioria no Núcleo de Pesquisa- Robótica localizado no Centro de Inovação Tecnológica do Centro Universitário Cesmac para a elaboração dos moldes, e no laboratório do Núcleo de Ciências Exatas e Tecnológicas Cesmac para a confecção dos concretos, contando com o apoio do Projeto Oceanos de Plástico.

2.1 Concreto sustentável

Visando apresentar uma nova reutilização dos plásticos descartados (PET e EPS) de forma inadequada e que podem ser encontrados principalmente nos oceanos, a diminuição da extração mineral e o melhoramento nas propriedades do concreto, a startup Policoncret desenvolveu um concreto sustentável não estrutural, cuja produção não acarreta alterações significativas no seu modo de preparo convencional.

A sua confecção se origina primeiramente da captação dos polímeros, que logo após, são separados por tipo, higienizados e triturados em um moinho triturador com capacidade de 200-250kg. Feito isso, o concreto é desenvolvido conforme as normas padrão [8 e 9]. E para garantir a sua eficiência e qualidade, durante a sua criação foram executados alguns testes como: Slump (ensaio feito enquanto o material está fresco, servindo para saber se possui trabalhabilidade e onde poderá ser utilizado), resistência à tração e à compressão axial (avalia se o concreto aguenta altas cargas, sendo essencial para a segurança), índice de vazios, absorção de água por imersão e massa específica (analisa a qualidade através das propriedades mecânicas e do seu desempenho), ensaio térmico e análise microscópica eletrônica de varredura [10,11 e 12].

Tais análises viabilizaram o uso dos polímeros plásticos reciclados como substitutos parciais da areia e da brita na confecção do concreto sustentável não-estrutural [13e 14] (Figura 1).



Figura 1- Conjunto de mesas de canto e conjunto de mesas e bancos para área externa entregues no Centro de Inovação Tecnológica pela Policoncret

2.2 Processo de desenvolvimento

O processo de desenvolvimento dos moldes dos cobogós da coleção *EcoFios da Arte*, da Policoncret, foi conduzido com o apoio de tecnologias de modelagem digital e prototipagem rápida. A metodologia adotada baseou-se na utilização do software de CAD 3D SolidWorks, que

permitiu o desenho preciso das geometrias dos cobogós, respeitando os critérios estéticos e funcionais definidos na etapa de concepção do projeto.

O fluxo de trabalho teve início com a criação dos desenhos bidimensionais dos cobogós, os quais foram posteriormente convertidos em modelos tridimensionais por meio da técnica de extrusão, uma ferramenta fundamental do SolidWorks que permite transformar perfis 2D em volumes sólidos. Essa abordagem possibilitou uma visualização clara do produto final e a realização de ajustes dimensionais e estruturais ainda na fase digital, otimizando o tempo e os recursos necessários para as etapas subsequentes (Figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7).

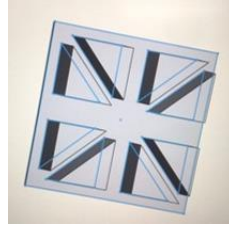


Figura 2- Molde do cobogó com extrusão

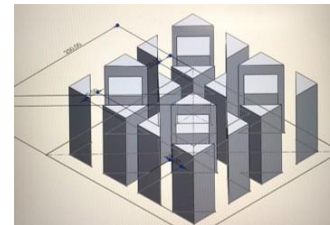


Figura 3- Molde do cobogó com extrusão

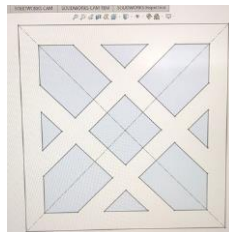


Figura 4- Desenho bidimensional do cobogó

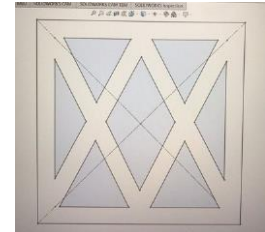


Figura 5- Desenho bidimensional do cobogó

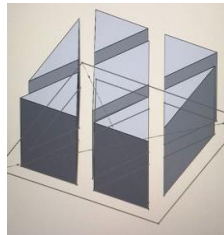


Figura 6- Molde do cobogó com extrusão

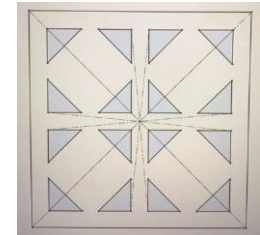


Figura 7- Molde do cobogó com extrusão

2.2.2 Prototipagem digital e molde 3D

Finalizado a criação dos modelos bidimensionais, o próximo passo foi o desenvolvimento do primeiro cobogó autoral, elaborado com polímeros reciclados, da coleção *EcoFios da Arte* “Olho de Pombo Redondo Coberto” a partir da modelagem do seu molde, além do seu protótipo. A coleção foi inspirada no bordado filé, ele é criado com temas florais em cima de uma trama que lembra a rede de pesca do marido das artesãs que vivem à beira das Lagoas Manguaba e Mundaú, no litoral alagoano. Após a modelagem digital, os arquivos foram exportados em formato STL, padrão para impressão 3D. Esse formato converte a geometria do modelo em uma malha de polígonos, tornando-o compatível com softwares de fatiamento utilizados pelas impressoras tridimensionais. Essa conversão é essencial, pois permite que o modelo seja processado em camadas sucessivas para a fabricação aditiva. Essa etapa viabiliza a confecção do molde e a prototipagem, realizados com os filamentos próprios da impressora 3D (*ABS - acrilonitrilobutadieno-estireno e PLA - ácido polilático*) [15,16,17 e 18] (Figuras 8 e 9).



Figura 8- Protótipo do molde



Figura 9- Cobogó Olho de Pombo Redondo Coberto

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Durante todo o processo foi possível perceber que a modelagem do cobogó “Olho de Pombo Redondo Coberto” assegurou o desenvolvimento de mais moldes por impressão 3D, proporcionando uma eficiência satisfatória, seja na agilidade da confecção ou na ótima exatidão geométrica. Também foi possível perceber que a exportação dos arquivos em formato STL possibilitou o processamento em softwares de fatiamento, fazendo com que a prototipagem em filamentos de ABS e PLA fosse possível. Os aspectos técnicos do processo também foram estudados, como os encaixes, ângulos de desmoldagem e a resistência do protótipo, comprovando mais uma vez a boa aplicabilidade da impressão 3D, devido a sua rápida produção e economia.

Após a confecção dos moldes, foi feito o preenchimento do cobogó com o concreto sustentável, que comprovou a exatidão geométrica e bom desempenho, indicando que o molde pode ser utilizado na produção de artefatos de concreto não-estrutural. Tais indicadores evidenciam que a união entre a modelagem 3D e o reaproveitamento de resíduos plásticos descartados de forma incorreta configura em um avanço promissor na produção de elementos da construção civil, ao associar design, tecnologia e princípios da economia circular, contribuindo também na mitigação os impactos ambientais e da proliferação de vetores.

4. DISCUSSÕES

O processo da prototipagem foi fundamental para validar aspectos como encaixes, ângulos de desmoldagem e resistência do protótipo antes da produção definitiva. O uso da impressão 3D permitiu a produção de protótipos de baixo custo em menor tempo, contribuindo para o processo de inovação na empresa Policoncret.

Com a confecção do molde através da impressão 3D, foi possível realizar o processo de moldagem do cobogó utilizando o concreto sustentável, composto por agregados reciclados (PET e EPS). O molde impresso serviu como base para a conformação das peças, possibilitando avaliar tanto o desempenho do material quanto a fidelidade geométrica do produto final.

5. CONCLUSÃO

O estudo confirma que o modelo proposto em 3D e as técnicas de engenharia de materiais propostas pelo grupo de pesquisa e aplicadas pela Policoncret representa um modelo de inovação sustentável que alia design, ciência e responsabilidade socioambiental. Sua principal contribuição está na formulação de um concreto com resíduos plásticos reciclados, que já apresenta aplicabilidade em produtos não estruturais, como cobogós.

As técnicas e metodologias empregadas na empresa demonstram que a tradição arquitetônica brasileira pode ser reinterpretada à luz das mais modernas técnicas de engenharia moderna, economia circular e das tecnologias digitais. Dessa forma, a modelagem 3D e a impressão de moldes oferecem um caminho promissor para o aprimoramento produtivo e estético.

Financiamento: A presente foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq Brasil, no âmbito do processo 405449/2022-4, “Projeto Oceanos de Plástico: Monitoramento da cadeia produtiva do plástico integrando estratégias de descarte e reciclagem para enfrentamento da poluição.” Coordenado pelo Dr. Jessé Marques da Silva Júnior Pavão.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer a Instituição Centro Universitário Cesmac, ao Programa de Pós-Graduação em Análises de Sistemas Ambientais (PPGASA), Ao Projeto Oceanos de Plástico (n. 405449/2022-4) e ao Laboratório de Emergia e Resiliência de Ecossistemas (LERE).

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

REFERÊNCIAS

1. SILVA, J. P. B. Novas tecnologias dos resíduos sólidos plásticos para construção de cidades inteligentes. Dissertação (Mestrado em Território, Ambiente e Sociedade) Universidade Católica do Salvador, Salvador, **2025**. Disponível em: <https://ri.ucsal.br/items/a20ea0bf-a5e6-479f-9782-9a697b309fc1>. (Acesso em: 21 ago. 2025)
2. Florêncio, E. Q. A impressão 3D em concreto e seu impacto na produção da arquitetura: O future da construção civil?. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do espaço habitado), Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, **2019**. Disponível em:

<https://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/5537>. (Acesso em: 21 ago. 2025).

3. Fernandes, A. V. B.; Amorim, J. R. R. Concreto sustentável aplicado na construção civil. *Caderno de Graduação- Ciências Exatas e Tecnológicas Unit*, Aracaju, **2014**, 2(1), pp. 79-104. Disponível em: file:///C:/Users/ACER/Downloads/amchagas,+art+9.pdf. (Acesso em: 21 ago. 2025).
4. Almeida, I. N. Impressão 3D e sua aplicação na engenharia civil. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil-Estruturas), Universidade de Coimbra, Portugal, **2021**. Disponível em: file:///C:/Users/ACER/Downloads/Impress%C3%A3o%203D%20e%20sua%20Aplica%C3%A7%C3%A3o%20na%20Engenharia%20Civil.pdf. (Acesso em: 21 ago. 2025)
5. Pinto, H. R. S.; Queiroz, N.; Cardoso, A.R.B.; & Souza, J. P. M. O desenvolvimento de elementos de proteção de fachada responsivos: explorando o cobogó. *XIX Congresso da sociedade Ibero-americana de gráfica digital 2015*, São Paulo, **2015**, 2(3). 10.5151/despro-sigradi2015-10013.
6. Camacho, D. O. J.; Sacht, H. M.; Vettorazzi, E. De los elementos perforados al cobogó: histórico de uso en la arquitectura brasileira y consideraciones sobre su adaptación al clima. *PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, 2017, 8(3), pp. 205-216. 10.20396/parc.v8i3.865U237.
7. Policoncret. Home. **Policoncret**. Disponível em: <https://www.policoncret.com.br/>. (Acesso em: 21 ago. 2025).
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67 (1998). *Concreto-Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro: ABNT.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 (2015). *Concreto- Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: ABNT.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 (2014). *Projeto de estruturas de concreto-Procedimentos*. Rio de Janeiro: ABNT.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 (2019). *Cimento Portland-Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778(2009). *Argamassa e concreto endurecidos-Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT
13. Feitosa Júnior, E. A. Análise da incorporação de materiais poliméricos em concretos: uma alternative para a diminuição do aporte de plásticos no ambiente. Dissertação (Mestrado em Análise de Sistemas Ambientais), Centro Universitário Cesmac, Maceió, **2019**.
14. Pacheco, R.L.; Soares, C. N.; de Santana, R.S.P.; dos Santos, A. F.; de Santana, M.S.A.; & Pavão, J. M.S. J. Polymer aggregates as a sustainable alternative for concrete production. *Revista de Gestão Social e Ambiental*. **2025**, 19(3), pp. 1-22. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n3-100>.
15. Silva, V. F.; Aguilera, L. S.; Ribeiro, J. L.; Corrêa, H. L.; Militão, D. S.; & Bandeira, V. C. M. Tecnologias de prototipagem aplicada na didática tradicional: modelagem 3D e desenho técnico. *Revista Foco*, **2024**, 17(5). <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v17n5-176>.
16. Souza, T. A.; Quirino, J. M. O uso da prototipagem por impressão 3D e seus benefícios na engenharia mecânica para indústria ou graduação. *Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula*, **2020**, 3(2). Disponível em: <https://revistas.icesp.br/index.php/TEC-USU/article/view/1456>. (Acesso em: 21 ago. 2025)
17. Borja, L. C. A.; Castro, D. A. Aplicações da modelagem 3D: Estudo de caso de prédio educacional do campus UEFS. *Graphica Rio 2011*, Rio de Janeiro, **2011**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/315483286_APLICACOES_DA_MODELAGEM_3D_ESTUDO_DE_CASO_DE_PREDIO_EDUCACIONAL_DO_CAMPUS_UEFS. (Acesso em: 21 ago. 2025).
18. Huang, T. C.; Lin, C. Y. From 3D modeling to 3D printing: Development of a differentiated spatial ability teaching model. *Science Direct*. **2017**, 34(2), pp. 604-613. <https://doi.org/10.1016/j.jtele.2016.10.005>.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Detection of Bacteria and Antibiotic Resistance Genes on Marine Plastics from the Coast of Maceió, Brazil

Ellymaira Freitas Pontes¹, Ana Carla da Silva Berto², Fredy Henrique Freire Cavalcanti³, Jessé Marques da Silva Júnior Pavão⁴, Letícia Anderson^{5*}

¹Laboratório de Expressão Gênica e Estudos Moleculares (LEGEM), Instituto de Química e Biotecnologia (IQB), Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

²Programa de Pós-graduação Análise de Sistemas Ambientais, Centro Universitário CESMAC

*Correspondence: leticia.anderson@iqb.ufal.br

Abstract: Marine plastic pollution represents a growing ecological and public health concern, as plastics provide surfaces for microbial colonization and potential dissemination of antibiotic resistance genes (ARGs). This study investigated bacterial communities and ARGs associated with marine plastics collected from four sites along the coast of Maceió, Alagoas, Brazil. Macroplastics were retrieved by trawling, and six samples were cut into mesoplastic fragments (5–25 mm), and processed for biofilm DNA extraction. Quantitative PCR (qPCR) assays, validated using reference bacterial strains, targeted pathogenic bacteria (*Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*) and ARGs (*bla*TEM-1, *bla*EC5, *acrF*, and *bla*CMY-121). All samples tested positive for *S. aureus*, confirming consistent bacterial colonization of plastics. The *bla*EC5 gene was detected in five samples, while *acrF*, *bla*TEM-1, and *bla*CMY-121 were variably distributed. Pathogen-specific genes also showed heterogeneous presence, with *E. coli* and *E. faecalis* detected in multiple samples. These findings demonstrate that marine plastics act as reservoirs of clinically relevant bacteria and ARGs, reinforcing their role as hotspots for antimicrobial resistance in the marine environment. Monitoring microbial communities associated with plastics is essential to understand their impact on ecological processes and potential risks to human health.

Keywords: *Escherichia coli*; *Enterococcus faecalis*; *Staphylococcus aureus*; 16S rRNA; ARGs

1. INTRODUCTION

Plastic pollution in oceans is estimated to be 10 million tons annually [1], and it has numerous impacts on ecosystems, including ingestion by larger organisms. Excessive production and lack of proper plastic treatment result in the accumulation of these materials in marine and terrestrial ecosystems, affecting fauna and flora [2, 3]. Plastics become habitats for microorganisms when discarded in marine environments, leading to the formation of biofilms on the surface of the plastic, impacting the dispersion of microorganisms, plastic degradation, as well as altering the marine microenvironment. These microorganisms include bacteria that can colonize floating plastic surfaces and be transported across oceans, becoming invasive species in other ecosystems [4]. Microbial biofilms can develop on different types of plastics due to their irregular surface and varied area [5]. Biofilm can protect plastic from degradation by ultraviolet (UV) radiation, or decrease its buoyancy and photocatalysis, thus increasing its permanence in the marine environment [6]. Genera of human pathogens such as *Escherichia coli*, *Pseudomonas*, *Enterococcus*, and *Staphylococcus* have been found associated with different types of marine plastics, such as polyethylene, polypropylene, and polystyrene. These pathogens can cause a variety of diseases, such as diarrhea. The presence of these pathogenic microorganisms in the microbial layer that are formed on the surface of plastics can increase their infectivity by promoting microbial growth and biofilm formation. Studies primarily used PCR of 16S ribosomal genes for detection of bacteria [7] as it is a conserved region across bacterial species [8]. Molecular techniques are increasingly being used to analyze the composition of the microbial community associated with plastics. This allows for large-scale identification of unusual microorganism genera using sequencing techniques, or even using specific techniques for predetermined targets, pathogenic organisms, or genes with specific activities [7]. Some studies also use the strategy of detecting antibiotic resistance genes [9]. Antibiotics are natural products or derivatives of natural products that are widely used to treat or prevent infections [10]. Both humans and animals are being widely treated with antibiotics, and these in turn are being frequently detected in freshwater, saltwater, and even drinking water, leading to an increase in antibiotic-resistant bacteria [11]. Using real-time Polymerase Chain Reaction (qPCR) technique, it has also been demonstrated that fecal bacteria, as well as antibiotic

resistance genes (ARGs) are present in biofilms attached to marine plastics. The use of molecular biology has become an efficient method for detecting pathogens through qPCR, as it is a highly sensitive and efficient technique for identifying and quantifying genetic material of microorganisms present in marine environments [12]. The presence of these resistance genes in bacteria that colonize the marine environment, as mentioned above, can impact both health of marine animals and human health, primarily through the insertion of these microorganisms into food chain. Monitoring the marine environment is important for developing strategies that can mitigate the problem of plastics and the spread of antibiotic-resistant microorganisms through these particles. The use of molecular methods is advantageous, as it is known that in most cases, it is not possible to cultivate environmental bacteria using standard laboratory methods. Furthermore, it allows for broader monitoring of microorganisms and their molecular profile of antibiotic resistance. Thus, to reveal the profile of bacteria associated with marine plastic and simultaneously characterize ARGs, qPCR has proven to be a highly sensitive and specific method for use in environmental samples [13]. It is important to notice that no environmental monitoring of the coastal area of the city of Maceió – AL has been made by using molecular techniques, therefore, the aim of this study was to characterize both bacterial communities and ARGs associated with marine plastics from this area.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Study area and sample collection

Marine macroplastic samples were collected on 26 June 2025 using an 8 m shrimp boat equipped with two otter trawls (mouth opening: 5 m; terminal mesh sizes: 20 mm and 18 mm). Trawling was performed at four predetermined sites along the coast of Maceió, Alagoas, Brazil. Recovered macroplastics were separated, transported at room temperature, and stored at -20°C until further analysis.

Prior to analysis, macroplastics were cut into fragments of approximately 525 mm (mesoplastics) [14] for biofilm DNA extraction.

2.2 Primer Validation and Positive Controls

Reference strains *Escherichia coli* ATCC 25922, *Enterococcus faecalis* ATCC 29212, and *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 were used to validate the designed primers and served as positive controls in qPCR assays. All strains were preserved in the laboratory's culture collection. These well-characterized strains have genomes and phenotypic stability, ensuring the reproducibility and reliability of amplification.

2.3 DNA Extraction and Quantification

DNA was extracted from biofilms adhered to six marine mesoplastic samples using the PureLink Genomic DNA Kit (Invitrogen), following the manufacturer's instructions. To improve nucleic acid yield, an enzymatic lysis step with lysozyme (37 °C for 30 min) was included prior to extraction. The same protocol was applied to bacterial culture samples of (*E. faecalis*, *S. aureus*, and *E. coli*), for methodological consistency.

DNA quantification was performed using the Qubit™ 1X dsDNA high-sensitivity (HS) assay kit (Thermo Fisher Scientific) according to the manufacturer's instructions. Fluorescence measurements (1–3 µL per sample) were obtained using a Qubit™ 4 fluorometer, and DNA concentrations (ng/µL) were automatically calculated based on the standard curve generated by the instrument.

qPCR assays were performed on a QuantStudio 1 Real-Time PCR System (Applied Biosystems, USA) using the GoTaq® qPCR Master Mix (Promega, USA) with BRYT® Green detection. Each reaction was prepared in a total volume of 10 µL containing: GoTaq® qPCR Master Mix (2x), DNA template (1–3 ng) and Primer mix (0.8 µM).

All reactions included no-template controls (NTCs). Primers were designed to have similar melting temperature (T_m). Amplification specificity was confirmed through melting curve analysis, with single peaks at expected melting temperatures indicating correct product formation.

2.4 Target Genes and Primers

Primers were designed from target sequences previously reported in the literature and obtained from NCBI. Oligonucleotide design was performed using Primer3 [15] with pre-established parameters. Specificity was verified *in silico* with Primer-BLAST and nBLAST, and to ensure binding to the target and exclude secondary structures (dimers), OligoAnalyzer was used. Primers were generated for bacteria detection (*E. coli*, *E. faecalis*, *S. aureus*, and 16S rRNA) and antimicrobial resistance genes (ARGs), including *blaTEM1*, *blaEC5*, *acrF*, and *blaCMY-121* (Table 1).

Table 1. Primers sequences used in qPCR assay and amplicon sizes.

Target	Forward primer (5'→3')	Reverse primer (5'→3')	Amplicon size (bp)
<i>E. coli</i>	AGGTGAAGGTGGAATGGTTGT	TGTAGCCTATAACGTCATGCCA	116
<i>E. faecalis</i>	CGGTGGCGGGTATTATGCTT	GCTTCTTGAACAACGGACGG	135
<i>S. aureus</i>	GCAACCAAATTCGCCAAAGC	GAGTCTAAAGCCGAATCTGACAT	126
16S rRNA	GGATTAGATACCCTGGTA	CCGTCAATTCATTTAAGTTT	143
<i>blaTEM-1</i>	TTGCACAACATGGGGGATCA	TTCATTGAGCTCCGGTTCCC	60
<i>blaEC5</i>	CAGGGGCGTTAGATGCTGAA	CCAGTAGCGAGATTGTGCCA	143
<i>acrF</i>	CAACAACCTCGGACGCTTTG	TCTTTCCAGGGTCATCGCC	128
<i>blaCMY-121</i>	CTGGGAGATGCTGAACTGGC	AGTGGAGCCCGTTTATGCA	148

2.5 Differential Distribution of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes Across Mesoplastic Samples

The qPCR assays revealed a clear distinction in the distribution of bacterial and resistance-related genes among the six mesoplastic samples (Table 2). Amplification of the 16S rRNA gene was positive only to samples MP1 and MP2. Pathogen-specific detection also followed variable findings: *E. coli* was detected in samples from MP1 to MP5; *E. faecalis* in MP2, MP4 and MP5; while *S. aureus* was detected in all samples. The detection of resistance-associated genes showed more variability. The *blaEC5* gene was detected in samples MP1, MP2, MP4 and MP5. The *acrF* gene, *blaTEM1* and *blaCMY-121* was not detected only in the MP6 sample.

Table 2. Detection of bacterial and antibiotic resistance genes in mesoplastic samples by qPCR.

Target Gene	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6
<i>E. coli</i>	+	+	+	+	+	-
<i>E. faecalis</i>	-	+	-	+	+	-
<i>S. aureus</i>	+	+	+	+	+	+
16S rRNA	+	+	-	-	-	-
<i>blaTEM1</i>	+	+	+	+	+	-
<i>blaEC5</i>	+	+	-	+	+	-
<i>acrF</i>	+	+	+	+	+	-
<i>blaCMY-121</i>	+	+	+	+	+	-

3. DISCUSSION

Our results confirm that plastics collected from the coastal area of Maceió harbor diverse bacterial communities and clinically relevant ARGs. The consistent detection of *S. aureus* across all samples demonstrates that bacterial colonization is a universal feature of the plastisphere, in agreement with previous reports that highlight plastic debris as a microbial substrate across marine environments [16]. Importantly, the presence of *blaEC5*, *acrF*, *blaTEM-1*, and *blaCMY-121* indicate that plastics can serve as reservoirs for bacterial resistance, supporting the conception that plastic debris contributes to the enrichment and persistence of ARGs in the ocean [17].

The *blaEC5* gene encodes resistance to cephalosporins [18]. Cephalosporins are broad-spectrum antibiotics widely employed in clinical practice; however, their effectiveness is threatened by diverse resistance mechanisms [19]. The detection of the *acrF* gene in our samples is consistent with previous reports identifying it among the most abundant resistance determinants in aquatic

sediments [20]. The detection of the *blaTEM-1* gene in our samples reinforces its role as a dominant resistance determinant in marine plastisphere and aquatic environments [21, 22].

The presence of *E. coli* reinforces the sanitary relevance of the findings, since this species is widely used as an indicator of the presence of enteric pathogens and of the risk to human health in aquatic environments [23]. Considering that virulent strains of *E. coli* may be present in the same habitat, the colonization of plastics in marine environments represents a potential risk for the dissemination of pathogens associated with gastrointestinal diseases and extraintestinal infections [24].

Similarly, the presence of enterococci highlights the dual character of this bacterial genus. Although some species are recognized as beneficial probiotics, the adaptation of *Enterococcus faecalis* [25] to hospital environments and their acquisition of antimicrobial resistance genes indicate that their presence on marine plastics should be interpreted as a potential threat [26]. These microorganisms may act as vehicles for the dissemination of resistance in different ecosystems, reinforcing the hypothesis that plastics function as hotspots of antimicrobial resistance.

Taken together, the findings of this study highlight that the accumulation of plastics in marine environments does not only represent an ecological threat but also a direct risk to public health, by facilitating the dissemination of pathogenic microorganisms and antibiotic resistance genes. Future research should investigate not only the microbial diversity associated with plastics but also the potential for effective transfer of resistance under environmental conditions and the influence of physicochemical variables on colonization.

4. CONCLUSIONS

The results presented here highlight the importance of environmental monitoring not only of plastic debris but also of the plastisphere, which serves as a vehicle for pathogenic bacteria and ARGs. This study provides the first evidence from plastics collected along the coast of Alagoas, applying molecular techniques for microbial characterization of biofilms. Importantly, our findings demonstrate that macroplastic particles present in the marine environment constitute a favorable niche for the colonization of microorganisms, functioning as substrates that not only promote the establishment of

biofilms but also favor horizontal gene transfer. Notably, the material analyzed was recovered during shrimp fishing activities, representing a dual indication of environmental contamination—through both the presence of pathogenic bacteria and the dissemination of an-tibiotic resistance—while occurring near a human food resource such as shrimp. Together, these results highlight both the consistent colonization of plastics by bacteria and the uneven but concerning presence of clinically important resistance genes within the plastisphere.

Funding: This research was funded by CNPq/MCTI-FNDCT CT-Petro N 43/2022, grant number 405449/2022-4.

Acknowledgments: We thank Prof. Dr. Robson G. Santos from the Laboratório de Ecologia e Conservação no Antropoceno (EcoaLab), Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de Alagoas, for providing the material analyzed in this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

1. Fernández-Juárez, V., López-Alforja, X., Frank-Comas, A., Echeveste, P., Bennasar-Figueras, A., Ramis-Munar, G., Gomila, R.M., Agawin, N.S.R.: “The Good, the Bad and the Double-Sword” Effects of Microplastics and Their Organic Additives in Marine Bacteria. *Front Microbiol.* 11, (2021). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.581118>
2. Karbalaei, S., Hanachi, P., Walker, T.R., Cole, M.: Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research.* 25, 36046–36063 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3508-7>
3. Napper, I.E., Thompson, R.C.: Plastic Debris in the Marine Environment: History and Future Challenges. *Global Challenges.* 4, (2020). <https://doi.org/10.1002/gch2.201900081>
4. Wright, R.J., Erni-Cassola, G., Zadjelovic, V., Latva, M., Christie-Oleza, J.A.: Marine Plastic Debris: A New Surface for Microbial Colonization. *Environ Sci Technol.* 54, 11657–11672 (2020). <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02305>
5. Debeljak, P., Pinto, M., Proietti, M., Reisser, J., Ferrari, F.F., Abbas, B., Van Loosdrecht, M.C.M., Slat, B., Herndl, G.J.: Extracting DNA from ocean microplastics: A method comparison study. *Analytical Methods.* 9, 1521–1523 (2017). <https://doi.org/10.1039/c6ay03119f>
6. Silva, M.M., Maldonado, G.C., Castro, R.O., de Sá Felizardo, J., Cardoso, R.P., Anjos, R.M. dos, Araújo, F.V. de: Dispersal of

- potentially pathogenic bacteria by plastic debris in Guanabara Bay, RJ, Brazil. *Mar Pollut Bull.* 141, 561–568 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.064>
7. Metcalf, R., Oliver, D.M., Moresco, V., Quilliam, R.S.: Quantifying the importance of plastic pollution for the dissemination of human pathogens: The challenges of choosing an appropriate ‘control’ material. *Science of The Total Environment.* 810, 152292 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152292>
 8. Martinez-Porchas, M., Villalpando-Canchola, E., Ortiz Suarez, L.E., Vargas-Albores, F.: How conserved are the conserved 16S-rRNA regions? *PeerJ.* 5, e3036 (2017). <https://doi.org/10.7717/peerj.3036>
 9. Botes, M., de Kwaadsteniet, M., Cloete, T.E.: Application of quantitative PCR for the detection of microorganisms in water. *Anal Bioanal Chem.* 405, 91–108 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00216-012-6399-3>
 10. Lermينياux, N.A., Cameron, A.D.S.: Horizontal transfer of antibiotic resistance genes in clinical environments. *Can J Microbiol.* 65, 34–44, (2019). <https://doi.org/10.1139/cjm-2018-0275>
 11. Wang, S., Xue, N., Li, W., Zhang, D., Pan, X., Luo, Y.: Selectively enrichment of antibiotics and ARGs by micro-plastics in river, estuary and marine waters. *Science of the Total Environment.* 708, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134594>
 12. Botes, M., de Kwaadsteniet, M., Cloete, T.E.: Application of quantitative PCR for the detection of microorganisms in water. *Anal Bioanal Chem.* 405, 91–108 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00216-012-6399-3>
 13. Abramova, A., Berendonk, T.U., Bengtsson-Palme, J.: A global baseline for qPCR-determined antimicrobial re-sistance gene prevalence across environments. *Environ Int.* 178, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.en-vint.2023.108084>
 14. Weber, C.J., Opp, C.: Spatial patterns of mesoplastics and coarse microplastics in floodplain soils as resulting from land use and fluvial processes. *Environmental Pollution.* 267, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.en-vpol.2020.115390>
 15. Rozen, S., Skaletsky, H.: Primer3 on the WWW for General Users and for Biologist Programmers. In: *Bioinformatics Methods and Protocols.* pp. 365–386. Humana Press, New Jersey
 16. Liang, H., de Haan, W.P., Cerdà-Domènech, M., Méndez, J., Lucena, F., García-Aljaro, C., Sanchez-Vidal, A., Ballesté, E.: Detection of faecal bacteria and antibiotic resistance genes in biofilms attached to plastics from human impacted coastal areas. *Environmental Pollution.* 319, 120983 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120983>
 17. Yang, Y., Liu, G., Song, W., Ye, C., Lin, H., Li, Z., Liu, W.: Plastics in the marine environment are reservoirs for antibiotic and metal resistance genes. *Environ Int.* 123, 79–86 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.061>
 18. Byarugaba, D.K., Erima, B., Wokorach, G., Alafi, S., Kibuuka, H., Mworozi, E., Musunguzi, A.K., Kiyengo, J., Najjuka, F., Wabwire-Mangen, F.: Resistome and virulome of high-risk pandemic clones of multidrug-resistant extra-intestinal pathogenic *Escherichia coli* (ExPEC) isolated from tertiary healthcare settings in Uganda. *PLoS One.* 18, e0294424 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294424>
 19. Gustaf Ferro, C.A., Steckelberg, J.M.: Cephalosporin Antimicrobial Agents and Related Compounds. *Mayo Clin Proc.* 66, 1064–1073 (1991). [https://doi.org/10.1016/S0025-6196\(12\)61731-5](https://doi.org/10.1016/S0025-6196(12)61731-5)
 19. Habibi, N., Uddin, S., Lyons, B., Al-Sarawi, H.A., Behbehani, M., Shajan, A., Razzack, N.A., Zakir, F., Alam, F.: Antibiotic Resistance Genes Associated with Marine Surface Sediments: A Baseline from the Shores of Kuwait. *Sustainability.* 14, 8029 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14138029>
 20. Jendrzewska, N., Karwowska, E.: Bacterial Resistance to β -Lactam Antibiotics in Municipal Wastewater: Insights from a Full-Scale Treatment Plant in Poland. *Microorganisms.* 10, 2323 (2022). <https://doi.org/10.3390/mi-258croorganisms10122323>
 21. Liang, H., de Haan, W.P., Cerdà-Domènech, M., Méndez, J., Lucena, F., García-Aljaro, C., Sanchez-Vidal, A., Ballesté, E.: Detection of faecal bacteria and antibiotic resistance genes in biofilms attached to plastics from human-impacted coastal areas. *Environmental Pollution.* 319, 120983 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.en-vpol.2022.120983>
 22. Walker, D.I., McQuillan, J., Taiwo, M., Parks, R., Stenton, C.A., Morgan, H., Mowlem, M.C., Lees, D.N.: A highly specific *Escherichia coli* qPCR and its comparison with existing methods for environmental waters. *Water Res.* 126, 101–110 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.032>
 23. Amaral-Zettler, L.A., Zettler, E.R., Mincer, T.J.: Ecology of the plastisphere. *Nat Rev Microbiol.* 18, 139–151 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0308-0>
 24. García-Solache, M., Rice, L.B.: The Enterococcus: a Model of Adaptability to Its Environment. *Clin Microbiol Rev.* 32, (2019). <https://doi.org/10.1128/CMR.00058-18>
 25. Park, J., Jin, G.-D., Pak, J.I., Won, J., Kim, E.B.: Development of a Rapid Identification Method for the Differentiation of Enterococcus Species Using a Species-Specific Multiplex PCR Based on Comparative Genomics. *Curr Microbiol.* 74, 476–483 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00284-017-1210-5>

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Social technology with production of sustainable concrete: The case of the municipality of Santa Luzia do Norte in Alagoas

Eugênio Dantas Gomes Lima ¹, Jessé Marques Pavão ^{2,4 6}, Clarissa Nascimento Soares ^{3 7}, Marcelo Reis ^{2 8}, Victoria Kamille de Castro Almeida ³

1. Dr. in Social Sustainability and Development – DSSD, from the Universidade Aberta – UAb-Portugal.
2. Permanent professor of the Postgraduate Program in Environmental Systems Analysis – PPGASA – Cesmac University Center – Maceió – Alagoas – Brazil.
3. Researcher at the Laboratory of Energy and Ecosystem Resilience – LERE - Cesmac University Center – Maceió – Alagoas – Brazil.
4. Coordinator of the Plastic Oceans Project – CNPq/MCTI-FNDCT-Petro n° 42/2022.

Abstract: This article shows the possible impacts on social, economic and environmental life that social technologies can bring to the most vulnerable territories. A solution emerged using these inorganic and organic waste as replacements of sand in the development of concrete artifacts, with special attention to hollow brick artifacts. This ethnographic research, based on participant observation, was aimed to identify and apply strategies for reducing both plastic wastage and reusing discarded shells. For now, it is concluded that it is essential to raise awareness in the territories bathed by CELMM about the impacts of plastic on the environment and to encourage responsible consumption and disposal practices, with the support of the startup Policoncret, a company incubated by CESMAC, and responsible for transferring this technology to the territories.

Keywords: Sustainability, Social technologies, Plastics in water

1. Introduction

The CESMAC University Center and the Plastic Oceans Project have been working together to produce research that helps create solutions that can reverse the impacts of pollution and plastic in lagoons and seas. The research is taking place in the Mundaú-Manguaba estuarine complex – CELMM, located in Alagoas, Brazil, which is home to a rich ecosystem and supports an important shellfish fishing, locally known as *sururu*. However, the growing plastic pollution in the region threatens the health of the environment and the viability of the production chain of this important fishery. The fact that plastic fragments into microplastics, which can be absorbed by the organisms and consequently enter the food chain, is highlighted. This ethnographic research, based on participant observation, was aimed to identify and apply strategies for reducing both plastic wastage and reusing discarded shells.

A solution emerged using these inorganic and organic waste as replacements of sand in the development of concrete artifacts, with special attention to hollow brick artifacts. Partial results include the creation of production groups formed by youth and women shellfish gatherers, who are learning to produce and sell these artifacts, thus creating a new source of income. With this, the aim is to mitigate the loss of biodiversity and reduce the impacts of pollution on *sururus*. For now, it is concluded that it is essential to raise awareness in the territories bathed by CELMM about the impacts of plastic on the environment and to encourage responsible consumption and disposal practices, with the support of the startup Policoncret, a company incubated by CESMAC, and responsible for transferring this technology to the territories. The project further aims to encourage engagement of local governments, authorities and citizens into implementing new public policies directed to reduce plastic waste and improve income of territories. We believe that with the consolidation of technologies for reusing discarded materials is one of the ways to enhance sustainability and citizen science.

2. Theoretical-methodological approach to social intervention

Currently, the world faces a series of social challenges such as health, housing, food, unemployment, and education, and both non-governmental and governmental organizations are increasingly seeking tools and methodologies for social intervention, searching solutions that re-duce or resolve these issues (Freitas, Vencio and Freitas, 2022). Driven by great transformations that have occurred over the years, the number of social problems increased, especially after the COVID-19 pandemic, exponentially growing the number of cases of people affected by these is-sues (Costa et. al., 2021).

Among the methods and techniques developed with the aim to mitigate existing problems, several practices were developed, including the so-called Social Technologies (Freitas, Kühl & Segatto, 2013; Dagnino, 2004, Dagnino, 2006) which, with the community engagement, can be a promoter for sustainability and transform lives, thus contributing to the fulfillment of some of the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda (Freitas, Vencio and Freitas, 2022).

According to the Brazilian Ministry of Science, Technology and Innovation (2011), Social Technologies are often associated with a transformative development proposal that seeks integrate a constructivist approach through active and collective participation in the processes of organization, creation and application. This initiative combines traditional community knowledge, social structuring and technical and scientific advances.

3. Impacts of pollution and plastic on lakes and seas

The high consumption of plastics, driven the material's impressive versatility, causes great concern in societies. Plastics are produced from petroleum, and present properties that makes the process of recycling and reuse highly convoluted, and thus constituting a severe danger to the environment in which it is inserted (UNEP, 2023; Capomaccio, 2025).

In aquatic environments, plastics can cause several risks to the health of the fauna, such as asphyxiation, poisoning, behavioral disorders, and even death. Through the food chain, it can also affect directly human beings, but also affect quality of life, economy, taxes, tourism and fishing (UNEP, 2021).

The health issues associated to plastic are commonly related to microplastics, particles resulting of the fragmentation of the polymer. Due their size, these particles are difficult to be identified and isolated, and can be present in cosmetics, food, water, and even dust. In living organ-isms, it has been found in brains, placentas, lung tissues, among others (Belo et. al., 2021; Silva, 2024).

In a classification proposed by Moraes et. al., (2024), microplastics can be primary and secondary. While primary plastics are developed from the production of small products, secondary plastics are developed from the degradation of materials, either through biotic or abiotic means. This implies that through time, microplastic absorption can became extremely harmful, as a result of the substances used to create the polymer, due the alien properties of the element to the environment, as an unnatural and bioaccumulated substance (Silva, 2024).

4. Sustainable concrete artifacts

The waste generated during construction has several classifications, among them, the class A, characterized by products that can be reused either on the construction site itself or in other sites. These include soil, gravel, ceramics, and bricks, which can be included in the composition of non-structural products as hollow brick artifacts (known locally as *cobogós*), concrete benches, gravel, topographic adjustments, interlocking floors, and curbs (Batista, 2022).

Recycling materials not only contributes to the ecological aspect, through their reuse, avoid-ing irregular dumping in landfills, which can lead to the proliferation of vectors, affecting the fi-nancial aspect and to sustainable development. Therefore, is reasonable to imply that communi-ties could highly benefit by the reuse of materials, either by reducing transportation costs, carbon emissions and contributing to the local circular economy (Ministry of Finance, 2025; Munaro and Tavares, 2022).

The circular economy, defined as a system based on the reuse and regeneration of materials or products, in a sustainable way, finds a good example in the development of sustainable con-crete using plastic polymers as partial substitutes for natural aggregates (such as sand and gravel) (Feitosa Júnior, 2019; Pacheco et. al., 2025). This technique is used by the Startup Policoncret, associated to the Plastic Oceans Project, which uses plastic collected on beaches to in the production of non-structural artifacts of sustainable concrete.

Incorrectly discarded polymers, washes, separates by type, weighs and transports to the laboratory of the Policoncret startup. There, the plastic is crushed and mixed with concrete, replacing sand and gravel by granulometry, and ultimately creating sustainable concrete artifacts. The overall formula varies according to the purpose of the artifact, and the diverse designs are inspired by local artisanal embroidery, reflecting and paying homage to the rich cultural heritage of Ala-goas.

According to the aforementioned research obtained results, it is possible to apply partial replacements of sand up to 10% of non-biodegradable plastic polymers, especially PP (Polypropylene), PS (Polystyrene), and PET (Polyethylene Terephthalate). In turn, gravel can be replaced up to 5% by EPS (Expanded Polystyrene), without affecting the performance of the concrete by Brazilian standards (ABNT, 2004). Furthermore, the insertion of plastic polymers in the product contributes to increasing the thermal and acoustic insulation capacity, in addition to reducing electrical conductivity (Pacheco et. al., 2025; Ourique, 2021).

5. The impacts of new technologies on the municipality of Santa Luzia do Norte and the Mundaú-Manguaba lagoons

The Mundaú-Manguaba Estuarine Complex, located in the state of Alagoas, Brazil, is home to a rich ecosystem and supports the important shellfish fishing activity. However, the growing plastic pollution in the region threatens the health of the environment and the viability of the production chain.

The irresponsible disposal of plastic waste, especially in coastal and river areas, is the main source of plastic pollution in the Mundaú-Manguaba Estuarine Complex.

The production and consumption of plastic products generate large volumes of waste that are often not disposed of properly. Shellfishes, like the sururu can filter and ingest fragments of plastic and this can cause digestive problems, intestinal obstruction and even death.

The accumulation of plastic in mangroves and other habitats of the species can reduce the availability of food and shelter for the mollusks. The plastic fragments into microplastics.

It is essential to raise awareness among the population about the impacts of plastic on the environment and to encourage responsible consumption and disposal practices. Governments and local authorities must implement public policies aimed at reducing the production and disposal of plastic, such as banning plastic bags and promoting recycling.

It is also necessary to invest in research to assess the impacts of plastic on the sururu production chain and identify solutions to mitigate these impacts. Local territories must be involved in the search for solutions to the problem of plastic pollution, through participation in clean-up campaigns, recycling projects and other initiatives.

The impact of plastic on the sururu production chain in the Mundaú-Manguaba Estuarine Complex requires joint actions, such as environmental education, public policies, scientific research and community engagement.

Therefore, it is important to collect qualitative data and information on the desires, interests and needs of plastic collectors and collectors, as well as producers and consumers of sururu, aiming to facilitate the creation of an organized production and marketing channel for plastic and sururu that meets the new guidelines of the consumption process, strengthening the links in the plastic and sururu production chain.

The Mundaú-Manguaba Estuarine Lagoon Complex (CELMM) covers the following municipalities in Alagoas: Coqueiro Seco, Maceió, Marechal Deodoro, Pilar, Santa Luzia do Norte and Satuba

Below, using photos taken in the municipality of Santa Luzia do Norte in Alagoas, we describe the flow of the process that uses local raw materials, originating from plastic waste and shells from sururus, to the production of concrete artifacts in the form of cobogós, floors and tables:



Shellfish gathering and the separation of the sururu mollusk from the shell and the collection of plastic waste on the banks of Lagoa Mundaú.



Weighing the plastics collected in the campaign with the territory and the use of the Plastix Social Currency as a playful reference in the production of collective consciousness



Final result with the delivery to the community of concrete artifacts containing plastic elements and sururu shells.

6. CONCLUSIONS

The results achieved so far include: the creation of production groups formed by young people and women shellfish gatherers, who are learning to produce and sell cobogós, thus creating a new source of income. This seeks to mitigate the loss of biodiversity and reduce the impacts of pollution on sururus, generating economic activity and greater socio-environmental and political awareness, provided by the project's experiences in the territory.

The methodology and work process reported in this article provide a flow of the first experiences, the basis for future action research that can involve more people and municipalities from CELMM, now with the support of city governments, building units for receiving, processing and storing plastic and sururu shells for later production of concrete artifacts.

Thus, as already explained, we have the potential to encourage local governments and authorities to engage in the implementation of new public policies aimed at reducing plastic waste and increasing the income of the territories, with the creation and consolidation of technologies for reusing sururu shells and plastic. Ultimately, the generation of sustainability and citizenship are the central objectives, bringing to the need for a new awareness of life on the planet, yet another strategy, to join all the others, originating from so many parts of the world.

REFERENCES

1. Batista, M. L. (2022). Gestão de resíduos na construção civil: ênfase no desenvolvimento sustentável Waste management in civil construction: emphasis on sustainable development. *Brazilian Journal of Development*, 8(4), 23356-23373. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-042>
2. Bauman, Zygmunt. Em Busca da Política. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed; 2001.
3. Modernidade Líquida. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed; 2000.
4. Globalização as Consequências Humanas. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed; 1999.
5. Campos, Vicente Falconi. Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia a Dia. 10. ed. Nova Lima: INDG, 2004.
6. Belo, I. C. B., Andrade, B. N. P., Miranda, J. P. A. & Drumond P. C. (2021). Microplásticos, seus Impactos no Ambiente e Maneiras Biodegradáveis de Substituição. *Revista Internacional de Ciências*, Rio de Janeiro, Brasil, 11(2), 214-228. <https://doi.org/10.12957/ric.2021.54481>
7. Boof. Leonardo. Sustentabilidade: O que é – O que não é: Petrópolis, RJ: Vozes, 2012
8. Costa, C. H., Vasconcelos, C. M. S., Souza, A. M. da C., & Lima, A. Érika F. . (2021). Understanding education in the face of socio-spatial inequalities in the Covid-19 pandemic: a memory in mini-tales based on the perception of students and teachers. *Research, Society and Development*, 10(16), e356101623963. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.23963>
9. Cunha, G.A.C. (2022). A importância da construção civil para a economia brasileira: a partir de uma abordagem insumo-produto. Dissertação (Mestrado profissional em economia), Programa de Pós-Graduação em Economia - Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa - IDP. Brasília, Distrito federal, Brasil. Disponível em: < <https://repositorio.idp.edu.br/handle/123456789/4304> >. Acesso em: 15 abr. 2025.
10. Dagnino, R.; Brandão, F.C. & Novaes, H.T. (2004). Sobre o marco analítico-conceitual da tecnologia social. In: *Tecnologia social: uma estratégia para o desenvolvimento*. Rio de Janeiro: Fundação Banco do Brasil (pp. 15-64). Disponível em: <https://ensino.ensp.fiocruz.br/TSA/documents/arquivo_110.pdf>. Acesso em: 06 fev. 2025
11. Dagnino, R. (Org.). (2014). *Tecnologia Social: uma ferramenta para construir outro mundo possível*. Campinas: Komedi.
12. Embrapa. (2018). *Fome zero e agricultura sustentável: contribuições da Embrapa*. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1096312/1/LivroCarlosBMedeirosODS2fomezeroeagriculturasustentavel.pdf>
13. Fagundes, T. F. da S., & Silva, L. B. da. (2022). Potential use of shellfish waste: a review. *Research, Society and Development*, 11(3), e43011326614. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26614>
14. Farias, M. D. G. (2023). *Produções de Tecnologia Social nos programas de pós-graduação da Universidade Federal do Maranhão: perspectivas e possibilidades*. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão, Brasil. Disponível em: <<https://tede.ufma.br/jspui/handle/tede/4647>>. Acesso em: 10 fev. 2025.
15. Feitosa Júnior, E. A. (2019). *Análise da Incorporação de Materiais Poliméricos em Concretos: Uma Alternativa para a Diminuição do Aporte de Plásticos no Ambiente*. Dissertação (Mestrado profissional em Análise de Sistemas Ambientais), Programa de Pós-Graduação em Análise de Sistemas Ambientais, Pró-Reitoria Adjunta de Pesquisa e Pós-Graduação- Centro Universitário Cesmac, Maceió, Alagoas, Brasil.
16. Ferreira, J. H. (2021). *Reutilização do resíduo da maricultura e caixa de leite longa vida em bloco artesanal e diversos artefatos*. Dissertação Bacharelado em engenharia de pesca. Universidade Federal Rural do Semi-árido. Pró-reitoria de Graduação Departamento de Ciências animais. Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/ceb74ceb-7271-4164-87c8-036d14f3fe25/content>> . Acesso em: 10 fev. 2025.
17. Figueiredo, M. M. D. (2024). *O impacto dos princípios ambientais, sociais e governamentais na realização do direito fundamental à habitação e na promoção de um meio ambiente ecologicamente equilibrado: um estudo de caso da BSPAR Incorporações*. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Direito) – Centro Universitário Christus, Fortaleza, Ceará, Brasil. Disponível em: <<https://repositorio.uni-christus.edu.br/jspui/handle/123456789/1715>>. Acesso em: 5 fev.2025.
18. Fonseca, L. P. da, Marinho, E. de C., Nascimento, J. C. R., da Silva, J. S., Almeida, T. G. da S., & de Albuquerque, T. H. S. (2016). Incorporação de pó de conchas de sururu em formulações de blocos de concreto. *Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT - Alagoas*, 3(2), 139–150. Recuperado de <https://periodicos.set.edu.br/cdgexatas/article/view/3101>
19. Freitas, C. C. G.; Kühn, M. R. & Segatto, A. P. (2013). *Tecnologiasocial e a sustentabilidade. Evidências da relação*. Interciencia, Caracas,

- Venezuela 38(3),229-236. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/339/33926977011.pdf>>. Acesso em: 06 fev. 2025
20. Freitas, C. C. G., Vencio, D. A. C., & Freitas, F. P. M. (2022). Social Technology Canvas: methodology for creating projects. *Research, Society and Development*, 11(12), e509111234797. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34797>
21. Fundação Nacional da Qualidade. *Cadernos de Excelência: Introdução ao Modelo de Excelência da Gestão*. São Paulo: Fundação Nacional da Qualidade, 2008.
22. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). (2024). ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável: Avaliação do progresso das principais metas globais para o Brasil. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/publicacoes.html>
23. Leal, A. P. (2021). Resíduos da Construção Civil: Uma Revisão Sobre as Possibilidades de Aplicação. *Revista Ibero-Americana de Humanidade, Ciências e Educação-REASE*. São Paulo, Brasil. 7(6), 459-483. <https://doi.org/10.51891/rease.v7i6.1385>
24. Lima, G. F. de, & Lopes, R. L. (2016). Impactos ambientais dos resíduos gerados na pesca artesanal de moluscos bivalve no distrito de Patané/Arez-RN. *HOLOS*, 4, 206–216. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.3668>
25. Lima, R. S. D. (2023). Aplicação da concha de sururu (*Mytella falcata*) na remoção de azul de metileno em solução aquosa. Tese (Doutorado em Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Materiais, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil. Disponível em:<<https://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/12237>>. Acesso em: 15 abr. 2025.
26. Lima, S. F., & Oliveira, K. C. da S. (2017). Formas alternativas do uso da casca do sururu. *Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT - Alagoas*, 3(3), 121. Recuperado de <<https://periodicos.grupotiradentes.com/cdgexatas/article/view/3712>>. Acesso em: 15 abr. 2025.
27. Ministério da Fazenda. (2025). Economia circular. Brasília, Distrito Federal, Brasil. Disponível em:<<https://www.gov.br/fazenda/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica/conheca-o-plano-de-transformacao-ecologica/economia-circu-lar>>. Acesso em: 20 de fev. 2025.
28. Medeiros, J. A. (2007). *Tecnologia Social: uma estratégia para o desenvolvimento sustentável*. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT).
29. Moraes, N. G., Olivatto, G. P., Lourenço, F. M. O., Lourenço, A. L. A. & Tornisiello, V. L. (2024). Microplásticos em Ambiente Aquáticos: Ocorrências, Riscos Ambientais, Técnicas Analíticas, Soluções e Perspectivas Futuras. *Revista Virtual de Química*, 16(3), 472-493. <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20240011>.
30. Munaro, M. R. & Tavares, S. F. (2022). A economia circular na construção civil: principais barreiras e oportunidades para a transição do setor. *Revista Tecnologia e Sociedade*, 18 (53), 54-71. <http://dx.doi.org/10.3895/rts.v18n53.15726>
31. Nunes, J. M., Longo, O. C., Alcoforado, L. F. & Pinto, G. O. (2020). The Civil Construction sector in Brazil and the current economic crisis. *Research, Society and Development*, 9(9), e393997274. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7274>
32. Paladini, Edson Pacheco. *Qualidade: Uso de Indicadores e Ferramentas na Gestão*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2012.
33. Pacheco, R. L., Soares, C. L., Santana, R. S. P., Santos, A. F., Santana, M. S. A. & Pavão, J. M. S. J. (2025). Agregado de Polímeros como Alternativa Sustentável para Produção de Concreto. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 19(3), 1-23. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n3-100>
34. Pinheiro, J. J. S. (2022). O Sururu de Capote na Comunidade Ribeirinha da Laguna Mundaú em Maceió. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Geografia) - Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/11419>>. Acesso em: 15 abr. 2025. Silva, M. V. M. L. e (2024). Produção e caracterização de PHB sintetizado por *Escherichia coli* modificada utilizando melaço como fonte de carbono. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas- Biologia Celular, Molecular e Microbiologia) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, Instituto de Biociência, Universidade Estadual Paulista. Rio Branco, São Paulo, Brasil. Disponível em:<<https://hdl.handle.net/11449/261517>>. Acesso em: 21 fev. 2025.
35. Silva, J. (2024). Microplástico é detectado no cérebro humano pela primeira vez. *Jornal da USP*. São Paulo, Brasil. Disponível em:<<https://jornal.usp.br/ciencias/microplastico-e-detectado-no-cerebro-humano-pela-primeira-vez/>>. Acesso em: 21 fev. 2025.
36. Tamano, L. T. O., de Lima, B. B. C., & de Magalhães Araujo, D. (2020). Fishing, processing, commercialization and a propose to fishery waste reuse of sururu mytella falcata in the mundaú lagoon, Maceió–al, Brazil. *Caminhos de Geografia*, 21(76), 306-320. <https://doi.org/10.14393/RCG217652255>
37. Tenório, A. A. B., & Marques, S. K. J. (2023). Avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental da produção de piso intertravado com agregado da concha de sururu. Dissertação Mestrado Profissional em Tecnologias Ambientais. Instituto Federal de Alagoas. Marechal Deodoro, Alagoas, Brasil. Disponível em: <<https://repositorio.ifal.edu.br/handle/123456789/605>>. Acesso em: 15 abr. 2025.
38. Ourite, M. A. (2021). Avaliação do Uso de Materiais Poliméricos na Composição do Concreto. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão e Tecnologia na Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Disponível em:< <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/39321>>. Acesso em: 21 fev. 2025.
39. Organização das Nações Unidas (ONU). (2020). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/ods2/>
40. United Nation Environment Programme-UNEP. Tudo o que preciso saber sobre a poluição plástica. Organização das Nações Unidas, [s.l.]. Disponível em:< <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-polui-cao-plastica>>. Acesso em: 21 fev. 2025
41. United Nation Environment Programme-UNEP. From Pollution to solution: A global assessment of marine littler and plastic pollution. United Nation Environment Programme. Disponível em:< <https://www.unep.org/interactives/pollution-to-SOLUTION/>>. aCESSO EM: 21 FEV. 2025.
42. Tundisi. José Galizia. *Água no século 21: enfrentando a escassez*. RIMA/IIE, 2003
43. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. Estudos avançados 22 (63), 2008.
44. Kaplan, Robert S.; Norton, David P. *A Estratégia em Ação: Balanced Scorecard*. 20. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1997.

Relation between plastic waste leakage in the oceans and socioeconomic factors: A statistical and wavelet coherence analysis

IWLDSON G S SANTOS ^{1,*}, ISNALDO I BARBOSA ², ADALGIZA FORNARO ³, DANIEL C ZACHARIAS ⁴, RODRIGO M S BRITO ⁵, and MICEJANE S COSTA ⁶

¹ UFAL, ICAT, LAMMA; iwldson@gmail.com

² UFAL, IM; isnaldo@pos.mat.ufal.br

³ USP, IAG; adalgiza.fornaro@iag.usp.br

⁴ USP, IAG; danizach@gmail.com

⁵ UFAL, IGDEMA; rodrigo.brito@igdema.ufal.br

⁶ UFAL, ICAT, LAMMA; micejane@yahoo.com.br

* Correspondence: iwldson@gmail.com; Tel.: (82)988133971

Abstract: Plastic waste pollution in the oceans is the second-largest global environmental threat, surpassed only by climate change. Brazil is among the leading contributors to this issue, driven by factors such as population growth, economic activity, and inefficient solid waste management. Therefore, the objectives of this study are: (i) perform detailed descriptive statistical and simple linear regression between the municipal estimates of leak-prone plastic waste in the oceans (LPW) and socioeconomic factors from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE); and (ii) apply wavelet coherence to assess the relationship between LPW and these socioeconomic variables. The analysis focused on the 20 Brazilian municipalities with the highest LPW potential based on 2022 data. Results indicated that São Paulo, Rio de Janeiro, and consequently the Southeast region exhibited the highest absolute LPW potential. Among the variables analyzed, municipal population had the strongest influence on LPW, followed by population density and gross domestic product (GDP). These findings highlight the urgent need for targeted public policies to improve the monitoring and control of plastic waste leakage in the marine ecosystems of Brazil and similar regions worldwide.

Keywords: Marine pollution; Waste management; Socioeconomic variables; Wavelet coherence; Brazil.

1. INTRODUCTION

Global plastic production is estimated at approximately 400 million metric tons (Mt) annually, corresponding to an average of 57 kilograms per capita [1]. Brazil, the ninth largest economy and the sixth most population country, possesses an extensive coastline of about 8,000 km and a vast network of river basins, many of which discharge directly in the Atlantic Ocean. As the leading plastic producer in Latin America, generating approximately 7 Mt annually, Brazil plays a critical role in regional plastic flows. Consequently, it ranks 16th among global contributors to marine plastic leakage and the 20th in single-use plastic waste generation [2].

Plastics debris enters the oceans through multiple pathways, including improper disposal of solid waste on beaches, soil, and rivers; inefficiencies in waste collection systems; and environmental disasters such as flooding and storms. Once in the oceans, plastic waste produced a broad range of detrimental effects, including threats to biodiversity, marine life, and navigation. These environmental impacts are frequently accompanied by socioeconomic consequences, such as income loss, housing vulnerability, and public health risks. Rivers serve as the primary pathways transporting plastic waste from land to sea, carrying debris through urban drainage systems, sewer networks, and natural watercourses [1-2].

According to the United Nations (UN), plastic pollution currently represents the second most significant threat to the global environment, surpassed only by climate change. In response to this growing concern, the objectives of the present study are: (i) perform a detailed descriptive statistical and simple linear regression between the municipal estimates of leak-prone plastic waste in the oceans and socioeconomic factors from the Brazilian Institute of Geography and Statistics; and (ii) apply wavelet coherence to assess the relationship between LPW and these socioeconomic variables.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Study area

Figure 1 shows the map of Brazil, highlighting the 20 municipalities with the highest potential for plastic waste leakage in the oceans, organized by region: North (Manaus and Belém), North-east (Teresina, Fortaleza, Natal, João Pessoa, Recife, Maceió, Aracaju, and Salvador), Central-West (Brasília, Goiânia, and Campo Grande), Southeast (Belo Horizonte, Contagem, Campinas, São Paulo, and Rio de Janeiro), and South (Curitiba and Porto Alegre).

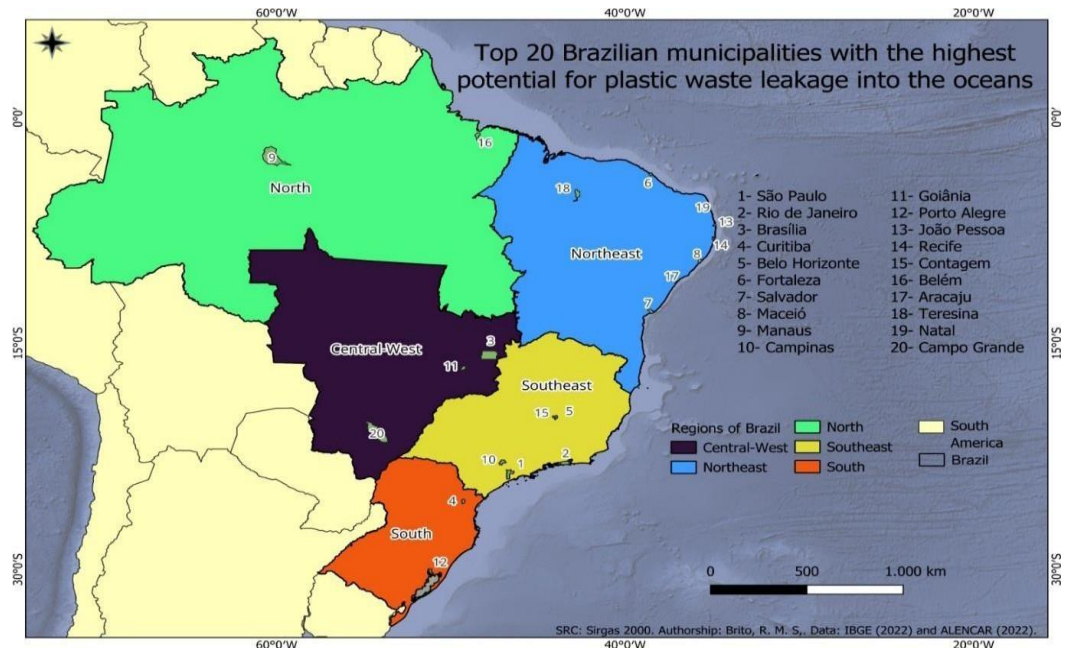


Figure 1. Map of the study area showing Brazil subdivided by regions and highlighting the municipalities with the highest leak-prone plastic waste in the oceans. Source: [1].

2.2 Dataset

This study employs the dataset compiled by [1], which estimated plastic waste leakage in the marine environment for all 5,570 Brazilian municipalities and emphasized the 20 with the highest leakage potential. Therefore, the dataset analyzed comprises these 20 Brazilian municipalities most susceptible to plastic waste leakage in the ocean in 2022. These data are referred to as leak-prone plastic waste in the oceans (LPW) with the unit of measurement being tons·year⁻¹.

Additionally, socioeconomic indicators from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) were incorporated, including municipal population (MP, millions of inhabitants), territorial area (TA, km²), demographic density (DD, inhabitants.km⁻²), school attendance rates for children aged 6 to 14 years (SCH, %), Municipal Human Development Index (MHDI), infant mortality rate (IM, deaths per 1,000 live births), and gross domestic product per capita (GDP) [4].

2.3 Wavelet coherence

The wavelet technique was used to detect the coherence between the estimated LPW data and the socioeconomic indicators from IBGE. The continuous wavelet transform (CWT, Eq. (1)):

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int x(\tau) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

In this equation, (t) denotes the Morlet wavelet function and can be dilated and translated along the spatial axis by the scale (a) and translation (b) parameters [5]. The term $x(t)$ refers to the signal (LPW and IBGE), while $(*)$ indicates the complex conjugate. The cross wavelet coherence (WC, Eq. (2)) quantifies the local dependency between two signals across time and frequency and identifies the regions where they exhibit significant joint variability.

$$WC = \frac{|S(TWC_{xy}(a,b))|}{(|TWC_x(a,b)|^2) \cdot S(|TWC_y(a,b)|)} \quad (2)$$

Where $(.)$ denotes a smoothing operator. WC values range from 0 to 1, with higher values indicating stronger coherence. The phase angle between the variables can be employed to examine their interactive relationship and lead-lag dynamics [5]. The phase angle between two signals is described by the following Eq. (3):

$$\theta_{xy}(a,b) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im} [TWC_{xy}(a,b)]}{\text{Re} [TWC_{xy}(a,b)]} \right) \quad (3)$$

2.3. Statistical analysis

Descriptive statistics (DS) were used to evaluate the individual characteristics of the LPW and IBGE. The DS included the mean (M, Eq. (4)), standard deviation (SD, Eq. (5)), coefficient of variation (CV, Eq. (6)), minimum (Min), first quartile (Q1), median (MD), third quartile (Q3), and maximum (Max). The equations for the descriptive statistics are listed below:

$$M = x(t) = \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) \quad (4)$$

$$SD = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i(t) - \bar{x}(t))^2} \quad (5)$$

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \cdot 100\% \quad (6)$$

Where $N = 20$ is the total number of values, (i) is the index ranging from 1 to N , $x_i(t)$ represents the values of the LPW and IBGE with their respective indices, and $\bar{x}(t)$ is the mean value. To identify whether there is a relationship between the LPW and IBGE, it was used a scatter plot along with simple linear regression (SLR, Eq. (7)), the coefficient of determination (R^2 , Eq. (8)), and

Pearson's correlation (r , Eq. (9)). These equations are shown below:

$$y(t) = a \cdot x(t) + b \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i(t) - y_i(t))^2}{\sum_{i=1}^N (x_i(t) - \bar{x}(t))^2} \quad (8)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i(t) - \bar{x}(t)) \cdot (y_i(t) - \bar{y}(t))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i(t) - \bar{x}(t))^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i(t) - \bar{y}(t))^2}} \quad (9)$$

Where (t) and $x(t)$ represent the LPW and IBGE, respectively, and (a) and (b) are the slope and intercept coefficients. The coefficient of determination ranges from 0 to 1 and was used to assess the quality of the SLR fit between the LPW and IBGE. The values of Pearson's correlation were classified according to [3].

Finally, the map of the study area was developed using QGIS software, in its most recent version. The Anaconda Navigator computational environment was used to perform DS analyses and SLR. The MATLAB® software (version R2021b) was employed for wavelet coherence analysis.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Descriptive statistic

Table 3 presents the DS of the LPW and IBGE datasets. The LPW showed a M value of 57,033.65 tons·year⁻¹, which is considerably lower than the Max value of 256,196.98 tons·year⁻¹ observed in São Paulo. The SD exceeded the M, indicating substantial variability, high dispersion, and the possible presence of outliers in the LPW data. Similar patterns were observed for MP and TA

data. São Paulo recorded the highest MP, with 11,451,999 inhabitants, while Manaus had the largest TA, approximately 11,401.00 km².

In terms of comparing datasets with different M, the statistical metric CV (%) provides in-sights in data homogeneity. Accordingly, the SCH rate and the MHDI were the most homogeneous variables, while TA, MP, and LPW were the most heterogeneous, respectively. Campo Grande recorded the highest SCH rate at 98%, while Brasília and Curitiba both exhibited the Max MHDI value of 0.82. Regarding the statistical metrics of the Q1, MD, and Q3 for the LPW data, it is observed that the MD values are closer to Q1 than to Q3. This indicates that the distribution of LPW data is right-skewed, exhibiting positive skewness. Similar patterns were found in the MP, TA, IM, and GDP data. In contrast, DD and the MHDI showed MD values closer to Q3 than to Q1, suggesting left-skewed distributions (negative skewness). The SCH data displayed a more symmetric distribution.

Table 2. Descriptive statistics (DS) of LPW - leak-prone plastic waste in the oceans (tons.year-1), MP – municipal population (millions of inhabitants), TA - territorial area (km²), DD - demographic density (inh.km-2), SCH- schooling from 6 to 14 years (%), MHDI - municipal human development index, IM - infant mortality (deaths per thousand live births), GDP - gross domestic product per capita (R\$). Statistical metrics: M - mean, SD - standard deviation, CV (%) - coefficient of variation, Min - minimum, Q1 - first quartile, MD - median, Q3 - third quartile, Max - maximum.

DS	LPW	MP	TA	DD	SCH	MHDI	IM	GDP
M	57.033,65	2.185.685	1.784,56	3.370,27	96,64	0,79	11,96	41.726,81
SD	61.464,46	2.514.919	3.029,25	2.477,28	0,97	0,03	2,68	18.144,87
CV	107,77	115,06	169,75	73,5	1,01	3,37	22,43	43,48
Min	18.886,80	602.757	167,40	111,11	94,2	0,75	7,75	21.706,06
Q1	28.285,35	890.150	288,98	1.382,72	96,08	0,76	10,16	27.116,41
MD	33.052,19	1.385.106	601,37	3.251,05	96,75	0,79	10,91	38.199,80
Q3	57.059,91	2.341.090	1.248,07	4.659,67	97,43	0,81	13,90	53.342,78
Max	256.196,98	11.451.999	11.401,00	7.775,52	98,00	0,82	17,15	92.732,27

3.2 Simple linear regression

Fig. 2 presents the SLR between the LPW and IBGE. Fig. 2A shows the strongest relationship between LPW and the MP. The results indicated a very good linear fit, with a positive slope coefficient, a correlation coefficient of $r = 0.97$, classified as almost perfect according with [1], and a coefficient of determination $R^2 = 0.94$, suggesting that 94% of the variation in LPW is explained by the MP variable. Therefore, the MP is a strong predictor of LPW.

Fig. 2C, 2E, and 2G show the relationships between LPW and DD, MHDI, and GDP, respectively. All three relationships exhibited a positive linear trend, with r ranging from 0.37 to 0.47, classified as moderate according to [1], and R^2 explaining between 13% and 22% of the variation. Thus, DD, MHDI, and GDP appear to be reasonably good indicators of LPW.

Fig. 2B, 2D, and 2F illustrate the relationships between LPW and TA, SCH, and IM, respectively. These cases did not exhibit strong relationships, as they showed decreasing linear trends with negative slope coefficients and weak to very weak negative correlations (ranging from -0.13 to -0.03), classified as low and very low according [1]. The coefficients of determination were in-sufficient to support the linear models as meaningful explanations for the observed relationships. Therefore, TA, SCH, and IM data do not appear to be reliable indicators of LPW.

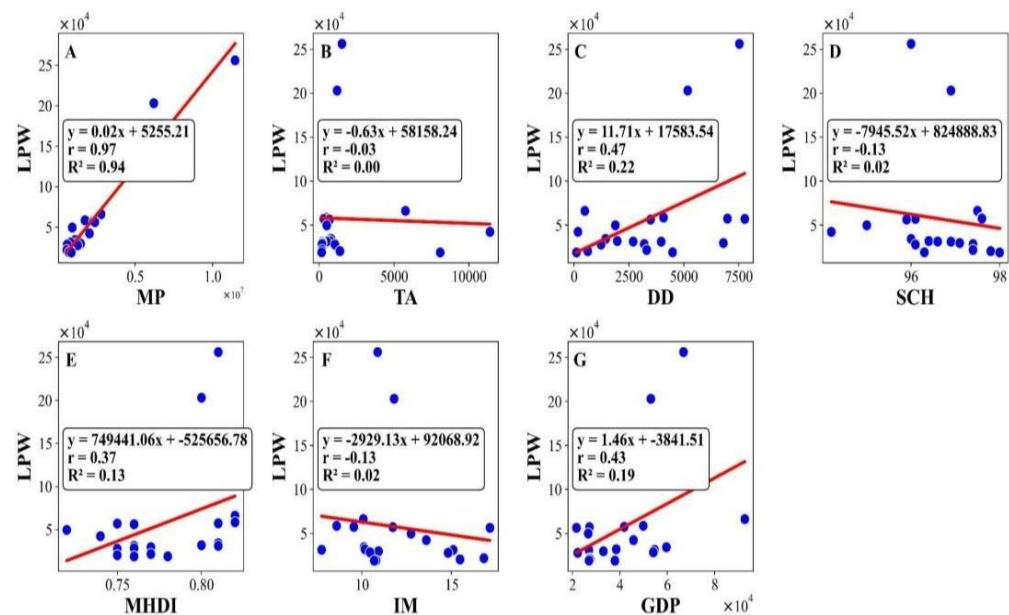


Figure 2. SLR between LPW and IBGE variables, including linear equation, Pearson's correlation, and coefficients of determination. Relationships shown: LPW vs. municipal population (A), territorial area (B), demographic density (C), schooling (D), municipal human development index (E), infant mortality (F), and gross domestic product (G).

3.2 Wavelet coherence

Fig. 3 displays the scalogram plots of the spatial wavelet coherence between LPW and IBGE. This graph analyzes the coherence between two signals across different spatial scales; the colors indicate the strength of coherence between the datasets, with yellow areas representing high coherence and blue areas indicating low or no coherence. The black arrows represent the phase relationship between the data, while the dashed white line marks the cone of influence [5].

Fig. 3A showed the highest degree of coherence between LPW and MP compared to the other variable pairs analyzed. The coherence magnitude was highest in the lower part of the graph, where yellow areas predominate, indicating a strong relationship between LPW and MP. In contrast, the blue areas in the upper part of the graph suggest low coherence, which may be associated with edge effects and less significant local variations. Moreover, the arrows pointing to the right in the high coherence region indicate that LPW and MP are in phase, increasing and decreasing together. Therefore, the wavelet coherence analysis suggests that MP has a direct influence on the increase of LPW.

Fig. 3C and 3G showed a high degree of coherence between LPW and DD and GDP. The coherence magnitude was highest in the left and lower portions of the graphs, where yellowish regions predominate, indicating a strong relationship between the variables, especially among the initial municipalities (São Paulo, Rio de Janeiro, and others). In Fig. 3C, the arrows in the coherent regions point to the right, indicating that LPW and DD are in phase. In contrast, in Fig. 3G, the arrows in the coherent areas point to the left, indicating that LPW and GDP are in opposite phases.

Thus, the wavelet coherence analysis reveals that DD has a direct influence on LPW, whereas GDP has an inverse influence.

Fig. 3B, 3D, 3E, and 3F exhibited a low degree of coherence between LPW and TA, SCH, MHDI, and IM, respectively. The predominance of bluish tones across most of the graphs indicates that these socioeconomic factors show low or no coherence with LPW. In Fig. 3B, only the first five municipalities displayed a greenish tone with arrows pointing to the left, indicating opposite phases. In Fig. 3D and 3E, the lower and upper right portions of the graphs showed light green and yellow colors, with arrows also pointing to the left. In Fig. 3F, only the lower left region of the graph presented green and yellow tones with arrows pointing to the right. Therefore, TA, SCH, MHDI, and IM do not appear to be the main drivers of the increase LPW.

In summary, the coherence between LPW and the socioeconomic variables analyzed varies across municipalities, indicating that there is no single pattern of influence. To mitigate the impacts

of LPW, public policies should focus on strategic and targeted actions tailored to each municipality. Through environmental education, sanitation infrastructure, and selective waste collection, especially in cities with high socioeconomic vulnerability.

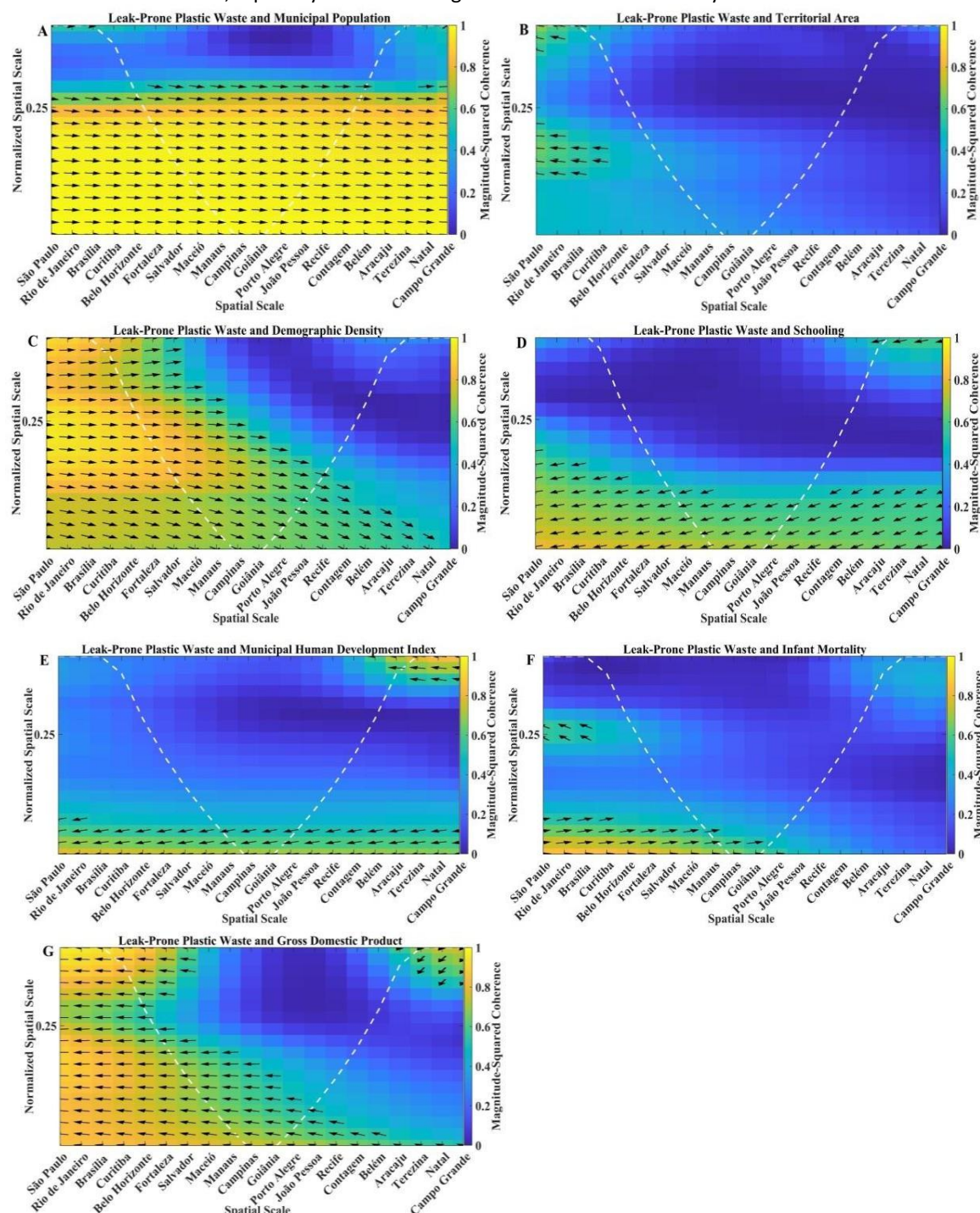


Figure 3. Wavelet coherence between the estimated LPW and socioeconomic data. LPW vs population (A), territorial area (B), demographic density (C), schooling (D), Municipal Human development Index (E), infant mortality (F), and gross domestic product (G).

4. CONCLUSIONS

Millions of tons of mismanaged plastic waste are prone to leaking in the oceans each year, resulting in significant environmental, ecological, and socioeconomic impacts. The analysis of the relationship between LPW with municipal socioeconomic variables, was successfully carried out.

The main findings include: (i) Municipalities with the highest leakage potential, São Paulo and Rio de Janeiro showed the highest absolute potential for LPW, being the only municipalities with

values exceeding 200,000 tons·year⁻¹. As a result, the Southeast region presented the highest potential contribution to this issue. (ii) Influence of socioeconomic variables, statistical analyses and Wavelet Coherence indicated that MP has a direct influence on the increase of LPW. DD and GDP showed a moderate relationship with LPW, while the other variables analyzed did not pre-sent significant correlations.

Finally, the results indicated that the Brazil contributes more than one million tons of LPW per year. The Southeast and Northeast regions consistently stood out as the most critical zones, reinforcing the importance of region-specific strategies. These findings may significantly contribute to the development of more effective public policies, supporting the management and monitoring of plastic waste with the potential to leak into marine ecosystems.

Acknowledgments: I would like to thank UFAL, UFCG, USP, IM, ICAT, UACA, IAG, CAPES, CNPQ and FAPESP for their institutional and financial support. Thanks God, family, teachers and friends.

REFERENCES

1. Alencar, M.V., 2022. Improving the source-to-sea approach for marine litter in Brazil. PhD thesis in Oceanography, University of São Paulo, São Paulo. Available at: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21134/tde-19092022-144406/publico/Dissertacao_Alen-car_Melanie_Corrigida.pdf (accessed 24 August 2025).
2. Alencar, M.V., Gimenez, B.G., Sasahara, C., Elliff, C.I., Velis, C.A., Rodrigues, L.S., Conti, L.A., Gonçalves-Dias, S.L.F., Cetrulo, T.B., Srich, V.M., Turra, A., 2023. Advancing plastic pollution hotspotting at the subnational level: Brazil as a case study in the Global South. *Mar. Pollut. Bull.* 194, 115382. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115382>.
3. Hopkins, W.G., 2009. A new view of statistics: correlation coefficient. New York: Internet Society for Sport Science. Available at: <http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html> (accessed 18 January 2025).
4. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024. Available at: <https://www.ibge.gov.br/pt/inicio.html> (accessed 24 August 2025).
5. Santos, I.G.S., 2024. Estatísticas de cinco variáveis meteorológicas no município de Craíbas no Estado de Alagoas. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. Available at: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/38015> (accessed 24 August 2025).

Entre pessoas e rios: Padrões de descarte irregular de resíduos sólidos em Maceió

Wanderson Freitas ^{1,2}, Larissa Oliveira¹, Livia Maria Batista Vilela^{1,2}, José Gilmar de Oliveira Jr.³ & Ciro Félix ^{1,2,*}

¹ Centro Universitário CESMAC;

² Programa de Pós-graduação em Análise de Sistemas Ambientais – PPGASA, CESMAC;

³ Universidade Federal de Alagoas – UFAL

* Contato: ciro.silva@cesmac.edu.br

Resumo: O descarte irregular de resíduos sólidos urbanos (RSU) representa um dos principais desafios socioambientais contemporâneos, com implicações diretas para a saúde pública, planejamento urbano e a conservação de ecossistemas. Nesse estudo se analisou a relação entre fatores demográficos e espaciais relacionando-os com o descarte irregular de RSU na área urbana de Maceió, Brasil. Os resultados revelaram que as variáveis foram significativamente associadas ao descarte irregular e explicaram 17% da variação do descarte na capital. Populações humanas maiores foram associadas a uma maior densidade de descarte irregular na maioria dos cursos d'água, sobretudo no Riacho Água de Terra, no Riacho Reginaldo e no Rio Jacarecica, localizados em áreas densamente urbanizadas. Já a proximidade com corpos d'água apresentou efeitos contrastantes: positiva em rios de maior urbanização e negativa em áreas periurbanas, como nos riachos Garça Torta e Doce. A população foi o fator mais influente, embora a proximidade também exerça papel relevante. Esses achados evidenciam a necessidade de políticas públicas específicas, que articulem gestão de resíduos, planejamento urbano e proteção de ecossistemas hídricos, reduzindo a transferência de poluição Terrestre para ambientes marinhos.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; Rios; Gestão Ambiental, Urbanização, Poluição.

• INTRODUÇÃO

A crise climática, a perda de biodiversidade e os avanços sobre os limites planetários estão associados a desastres ambientais, perdas agrícolas e mudanças nos padrões de ocorrência de doenças [1]. A intrínseca interdependência entre o meio ambiente, o bem-estar e a saúde humana é amplamente reconhecida no meio científico e cada vez mais discutida pela sociedade [2]. Nesse contexto, destaca-se o papel do descarte irregular de resíduos sólidos urbanos (RSU), cuja poluição compromete a dinâmica das cidades, prejudica o trânsito, obstrui sistemas de drenagem, eleva o risco de inundações e potencializa a disseminação de doenças infecciosas [3].

O impacto ambiental do descarte irregular de RSU é amplo e multifacetado. Nas cidades, a grande quantidade de resíduos gerados pelas atividades humanas, muitas vezes sem destinação adequada, compromete a qualidade ambiental, ameaça a saúde pública e reduz a resiliência dos ecossistemas [3,2]. A tendência global de crescimento populacional, que pode alcançar 10,4 bilhões

de pessoas até 2100 [4], aliada a um estilo de vida consumista, tem intensificado a geração de resíduos. No Brasil, por exemplo, a produção de RSU em 2018 foi de 216.629 toneladas diárias, com aumento de 4% no período pós-pandemia devido a mudanças nos padrões de consumo [5,6].

Os resíduos descartados irregularmente não permanecem restritos ao espaço urbano imediato, alcançando corpos hídricos e gerando impactos que extrapolam fronteiras locais. Os rios e riachos urbanos são particularmente vulneráveis, pois funcionam como receptores diretos desses resíduos. Estudos apontam que a proximidade de áreas populosas a canais de drenagem está entre os fatores que explicam a concentração de lixo em ambientes aquáticos [7–10]. Esse material, ao ser transportado pelas chuvas, chega aos sistemas fluviais e, posteriormente, aos ecossistemas costeiros e marinhos [11], criando um elo direto entre a poluição terrestre e a marinha e contribuindo para problemas globais como a disseminação de microplásticos e a perda de biodiversidade aquática.

Apesar da gravidade dos impactos, a compreensão sobre os padrões espaciais do descarte irregular de resíduos ainda é limitada, o que dificulta a formulação de estratégias eficazes de mitigação. A escassez de informações detalhadas sobre a distribuição desse fenômeno e sua relação com variáveis demográficas, geográficas e socioeconômicas constitui um obstáculo para a gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos. Diante desse cenário, o presente estudo busca analisar a relação entre o tamanho da população humana, a proximidade a corpos d'água urbanos e a ocorrência de descarte irregular de RSU na área urbana do Município de Maceió, capital do estado de Alagoas/Brasil, contribuindo para uma compreensão mais integrada dessa problemática e para a produção de informação que possa subsidiar o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no município de Maceió, capital do estado de Alagoas, Brasil, localizado na região Nordeste. O município possui uma área de aproximadamente 510 km² e uma população estimada em 1.031.597 habitantes [14] e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,772. O município apresenta coleta de resíduos de aproximadamente 1,02 kg/hab./dia, equivalente a 1.050 t/dia [15].

2.2 Dados de pontos de descarte irregular de resíduos sólidos urbanos (RSU)

As informações sobre os pontos de descarte irregular de resíduos sólidos foram fornecidas pela Autarquia de Desenvolvimento Sustentável e Limpeza Urbana de Maceió (ALURB). No total, foram disponibilizados 198 pontos de descarte, sendo considerados apenas os 186 situados na área urbana do município, delimitada a partir da malha cartográfica oficial do IBGE [14].

2.3 Processamento espacial e densidade de Kernel

A análise espacial foi conduzida no software QGIS (versão 3.22). Inicialmente, os pontos de descarte irregular foram sobrepostos à malha urbana, permitindo a caracterização da sua distribuição espacial. Para identificar áreas de maior concentração, foi realizada a estimativa de densidade de Kernel (Kernel Density Estimation – KDE). O raio de influência adotado foi de 1.000 metros, e o tamanho do pixel definido foi de 100 × 100 metros. Esse procedimento gerou uma superfície contínua representando a intensidade de ocorrência dos descartes irregulares no espaço urbano de Maceió.

2.4 Variáveis espaciais e demográficas

A base cartográfica referente aos rios e riachos de Maceió foi obtida no portal de dados abertos do estado de Alagoas [16]. Com essas informações, foi calculada a distância em metros de cada pixel da superfície de densidade ao curso d'água mais próximo, também no QGIS. Para tornar a variável mais intuitiva, os valores de distância foram transformados em uma métrica de proximidade, na qual valores mais elevados indicam maior proximidade aos corpos hídricos.

As informações referentes à população humana foram extraídas do Censo Demográfico 2022, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [14]. A variável populacional foi obtida em nível de setor censitário e posteriormente agregada aos pixels da superfície de densidade de Kernel por meio de técnicas de junção espacial.

2.5 Análise estatística

Para investigar a relação entre a densidade de descarte irregular de resíduos sólidos e as variáveis ambientais e demográficas, foi ajustado um modelo linear no software R (versão 4.3.2). A variável resposta foi a densidade de descarte irregular (KDE), enquanto as variáveis explicativas incluíram:

(i) proximidade em relação a rios e riachos urbanos, (ii) população humana por setor censitário, ambas em interação com os diferentes cursos d'água que atravessam a mancha urbana.

Antes do ajuste final, os pressupostos do modelo (normalidade dos resíduos, homocedasticidade, independência e ausência de multicolinearidade) foram avaliados graficamente e por meio de testes estatísticos. A visualização dos resultados foi realizada por meio de gráficos produzidos no R, permitindo a interpretação da intensidade e direção dos efeitos estimados.

3. RESULTADOS

As variáveis explicativas população e proximidade em interação com os diferentes corpos hídricos que atravessam Maceió revelou-se estatisticamente significativo ($gl = 15030$; $F = 227$; $p < 0,0001$) e foi capaz de explicar uma parcela moderada (R^2 -ajustado=17%) do descarte irregular de resíduos sólidos urbanos em Maceió. O efeito da variável população sobre o descarte irregular variou entre os corpos hídricos analisados. Em quase todos os casos, o aumento do tamanho da população esteve associado a maior intensidade de descarte, com coeficientes positivos e significativos. Esse padrão foi particularmente evidente no Riacho Água de Terra ($\beta = 5,72e-06$; $p < 0,001$), no Rio Jacarecica ($\beta = 1,70e-06$; $p < 0,001$) e no Riacho Reginaldo ($\beta = 1,78e-06$; $p < 0,001$), o primeiro e o último localizados em áreas fortemente urbanizadas e populosas, como pode se observar na Figura 1. A única exceção foi o Rio Mundaú ($\beta = -3,76e-07$; $p = 0,27$), onde a população não apre-sentou efeito significativo sobre a variação da densidade de descarte.

A variável proximidade aos corpos hídricos também apresentou efeitos distintos conforme o curso d'água considerado. Em alguns casos, como no Riacho Água de Terra ($\beta = 0,203$; $p < 0,001$), no Riacho Reginaldo ($\beta = 0,310$; $p < 0,001$), no Rio Carrapatinho ($\beta = 0,224$; $p < 0,001$), no Rio Jacarecica ($\beta = 0,118$; $p < 0,001$) e no próprio Rio Mundaú ($\beta = 0,255$; $p < 0,001$), observou-se associação positiva, indicando que quanto mais próximos estavam desses cursos d'água, maior era o descarte irregular. Por outro lado, nos riachos da Garça Torta ($\beta = -1,025$; $p = 0,003$) e Doce ($\beta = -0,219$; $p < 0,001$), verificou-se associação negativa, sugerindo que a proximidade pode, em alguns contextos, atuar como fator de redução do descarte, em ambos os casos esses pontos consistem em zonas periurbanas, menos urbanizadas e populosas.

A análise da importância relativa dos efeitos, obtida a partir da ANOVA, mostrou que a população foi a variável mais influente no modelo, explicando 47,8 (10%) unidades da soma de quadrados. A variável proximidade, embora também altamente significativa, explicou um pouco mesmo, 36,5 unidades (7,5%), representando impacto ligeiramente menor. Assim, os resultados indicam que, apesar da relevância da proximidade em relação aos cursos d'água, a variável populacional exerce uma influência sutilmente maior sobre a distribuição espacial do descarte irregular.

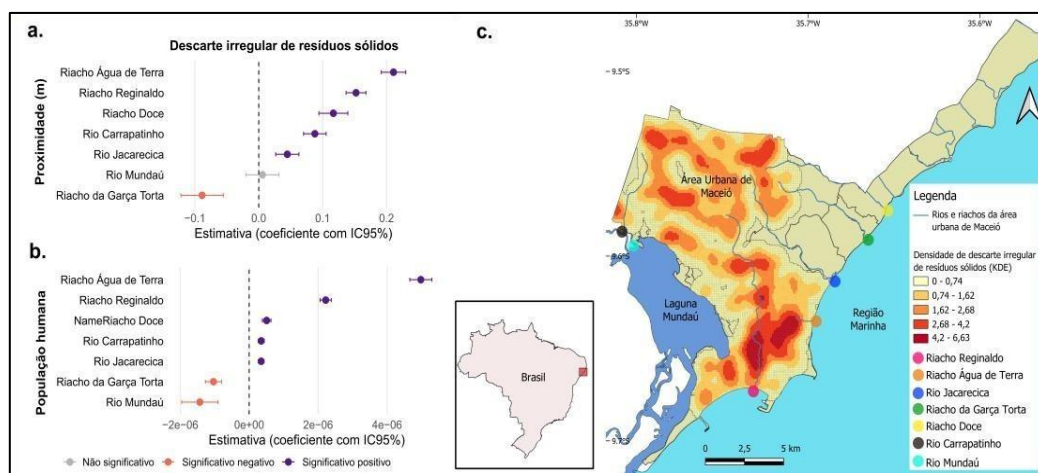


Figura 1. Fatores espaciais associados ao descarte irregular de resíduos sólidos urbanos em Maceió. (a) e (b) Gráficos dos coeficientes padronizados (Beta) resultantes da análise estatística, mostrando a força e a direção da relação entre a densidade de pontos de descarte (estimada por Kernel) e a (a) proximidade de corpos d'água (rios e riachos) e a (b) População humana do setor censitário (Censo de 2022). (c) Mapa de localização do município de Maceió com sobreposição do mapa de densidade de Kernel (heatmap) dos pontos de descarte irregular, destacando a rede hidrográfica urbana investigada.

4. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que a dinâmica do descarte irregular de resíduos sólidos em Maceió está fortemente relacionada a fatores demográficos e ambientais, em consonância com achados de outros estudos conduzidos em contextos urbanos [7–9]. O modelo ajustado explicou cerca de 17% da variação do fenômeno, um valor que reforça tanto a relevância das variáveis analisadas quanto a complexidade do problema, que envolve múltiplos fatores socioeconômicos e de infraestrutura [3].

O efeito da população sobre a densidade de descarte foi positivo e significativo na maioria dos corpos hídricos, especialmente no Riacho Água de Terra, no Riacho Reginaldo e no Rio Jacarecica,

todos localizados em áreas densamente urbanizadas. Esse padrão corrobora que o crescimento populacional e a pressão antrópica ampliam a geração de resíduos e, em cenários de crescimento desordenado, comum em muitas cidades brasileiras e em outros locais do planeta, a gestão se torna ineficiente ou inadequada, aumentando a probabilidade de descarte irregular [8,12].

Por outro lado, a ausência de efeito significativo no Rio Mundaú sugere a existência de particularidades locais, possivelmente associadas à menor pressão urbana direta ou a diferentes dinâmicas de uso e ocupação do solo na bacia. Além disso, apenas uma pequena porção do rio em questão foi considerada na análise, visto que o mesmo desemboca na Laguna Mundaú, mas se estende por dois estados (Pernambuco e Alagoas) e dezesseis municípios.

A variável proximidade com corpos d'água também demonstrou forte influência, mas com efeitos divergentes conforme o curso d'água analisado. Em rios e riachos com maior urbanização adjacente, como o Reginaldo, o Carrapatinho e o Jacarecica, verificou-se associação positiva entre proximidade e densidade de descarte, indicando que esses corpos hídricos ocorrem em locais com maior descarte irregular de resíduos. Esse resultado está alinhado com estudos que apontam a tendência de deposição de resíduos em áreas marginais a cursos d'água urbanos, especialmente em contextos de infraestrutura precária de coleta e vulnerabilidade socioeconômica [13,10]. Em contrapartida, nos riachos da Garça Torta e Doce, observou-se associação negativa, sugerindo que nesses locais a menor urbanização gera uma menor pressão populacional, consequentemente um menor nível de descarte irregular próximo aos corpos d'água.

A análise de importância relativa confirmou que a população foi a variável mais influente do modelo, embora a proximidade ao corpo d'água também se mostre um fator relevante. Estudos prévios já destacaram a sinergia desses fatores, mostrando que áreas de alta densidade populacional próximas a cursos d'água configuram hotspots de poluição urbana [9,11].

5. CONCLUSÕES

De modo geral, os resultados mostram que a gestão do descarte irregular em Maceió precisa considerar simultaneamente a distribuição da população e a vulnerabilidade dos cursos d'água. A variação do efeito da proximidade entre os diferentes corpos hídricos evidencia a importância de estratégias específicas para cada contexto, integrando planejamento urbano e proteção ambiental. Entender como fatores demográficos e espaciais interagem pode orientar políticas públicas mais eficazes, capazes de reduzir a pressão sobre os ecossistemas aquáticos e limitar a transferência de poluição do meio terrestre para o marinho. Apesar da relevância das variáveis analisadas, apenas uma fração do fenômeno foi explicada, confirmando seu caráter multifatorial e a necessidade de explorar outros determinantes para aprimorar a compreensão dos padrões e, assim, aumentar a precisão das ações de gestão.

Agradecimentos: Agradecemos à Autarquia de Desenvolvimento Sustentável e Limpeza Urbana de Maceió (ALURB) pela disponibilização dos dados e pela recepção gentil e colaborativa, em especial à sua diretora-executiva, Msc. Kedyna Tavares.

REFERÊNCIAS

1. Mahon, M.B.; Richardson, R.B.; Smiley, T.M.; Souza, W.M.; Weaver, S.C. A meta-analysis on global change drivers and the risk of infectious disease. *Nature* 2024, 629, 830–836. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07380-6>.
2. Scharlemann, J.P.W.; Mant, R.C.; Balfour, N.; Brown, C.; Burgess, N.D.; Guth, M.; et al. Global goals mapping: the environment-human landscape. University of Sussex Report 2017. Available online: <https://hdl.handle.net/10779/uos.23447141.v1> (accessed on 1 September 2025).
3. Almeida, L.S.; Cota, A.L.S.; Rodrigues, D.F. Saneamento, arboviroses e determinantes ambientais: impactos na saúde urbana. *Ciênc. Saúde Coletiva* 2020, 25, 3857–3868. <https://doi.org/10.1590/1413-812320202510.30712018>.
4. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects 2022: Summary of Results. UN DESA/POP/2022/TR/NO.3; United Nations: New York, NY, USA, 2022.
5. ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019; Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais: São Paulo, Brazil, 2019.
6. ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021; Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais: São Paulo, Brazil, 2023.
7. Ariho, P. A mathematical model of solid waste accumulation and treatment with a varying human population size. *Biomath Commun.* 2022, 9, 1–12. <https://doi.org/10.55630/bmc.2022.03.238>.
8. Chen, Y.C. Effects of urbanization on municipal solid waste composition. *Waste Manag.* 2018, 79, 828–836.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.017>

9. Kebede, H.A.; Ayenew, W. Solid waste disposal site selection analysis using geospatial technology in Dessie City, Ethiopia. *Heliyon* 2023, 9, e18865. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18865>.
10. Pace, G.; Lourenço, J.; Ribeiro, C.; Rodrigues, C.; Pascoal, C.; Cássio, F. Spatial accumulation of flood-driven riverside litter in two Northern Atlantic Rivers. *Environ. Pollut.* 2024, 329, 123528. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123528>.
11. Farooq, M.; Nisa, F.; Manzoor, Z.; Tripathi, S.; Thulasiraman, A.; Khan, M.; Khan, M.; Gani, K. Abundance and characteristics of microplastics in a freshwater river in northwestern Himalayas, India—Scenario of riverbank solid waste disposal sites. *Sci. Total Environ.* 2023, 891, 164027. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164027>.
12. Lu, C.; Li, W.; An, C. The GHG emission determinants research for waste disposal process at city-scale in Baoding. *Sustain. Cities Soc.* 2020, 59, 102203. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102203>.
13. Salles, A.; Wolff, D.; Silveira, G. Solid wastes drained in an urban river sub-basin. *Urban Water J.* 2012, 9, 21–28. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2011.633612>.
14. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo Demográfico 2022; IBGE: Rio de Janeiro, Brazil, 2022.
15. Instituto Água e Saneamento. Municípios e saneamento. Available online: <https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/> (accessed on 1 September 2024).
16. Governo de Alagoas. Dados geoespaciais – Hidrografia de Maceió. Available online: <https://dados.al.gov.br/> (accessed on 1 September 2025).

Informativo Técnico sobre Resíduos de Serviços de Saúde: Impactos do Descarte Incorreto na Saúde Humana e no Meio Ambiente

Luana Rosa Gomes Torres¹, Flavia Alves de Matos Barbosa², Marcos Farias Mota³, Pedro Henrique Oliveira Silva⁴, Kathyany Estêvo Lima⁵ and Aldenir Feitosa dos Santos*

¹ Affiliation 1; luana.torres@cesmac.edu.br

² Affiliation 2; flaviaalves.fa13@gmail.com

³ Affiliation 3; marcos.mota999@gmail.com

⁴ Affiliation 4; pedrohenri.faculdade@gmail.com

⁵ Affiliation 5; katylimakel@gmail.com

* Correspondence: afeitosasantos@cesmac.edu.br

Resumo: Os resíduos de serviços de saúde (RSS) representam um grande desafio para a saúde pública e ambiental devido ao seu potencial infeccioso, químico e radioativo. Este trabalho tem como objetivo oferecer a estudantes e profissionais da saúde informações técnicas sobre a classificação, o manuseio e o destino dos RSS, destacando os riscos associados ao descarte inadequado. Com base na legislação brasileira — incluindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), a Resolução RDC 222/2018 da ANVISA e a Resolução CONAMA 358/2005 — este estudo sistematiza as principais categorias de resíduos: biológicos, químicos, radioativos, comuns e perfurocortantes. A análise demonstra que práticas incorretas de gestão podem causar infecções virais e bacterianas, intoxicações químicas, acidentes ocupacionais e contaminação do solo, da água e do ar. Por outro lado, o manejo correto — com segregação na fonte, uso de recipientes resistentes e identificados, autoclavagem, incineração e reciclagem segura — reduz significativamente os riscos. Ressalta-se ainda a importância do treinamento contínuo de profissionais, do monitoramento ambiental e da fiscalização rigorosa. Conclui-se que o gerenciamento sustentável dos resíduos de saúde é essencial para proteger vidas humanas e preservar os ecossistemas.

Palavras-chave: Resíduos de serviços de saúde; Saúde pública; Contaminação ambiental; Gerenciamento de resíduos; Biossegurança; Riscos ocupacionais.

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos de serviços de saúde (RSS) são materiais descartados por hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias e instituições acadêmicas. Eles podem conter agentes biológicos, químicos ou radioativos com elevado potencial de contaminação. O descarte inadequado desses resíduos pode resultar em poluição do solo, da água e do ar, além de expor trabalhadores da saúde e comunidades a infecções e intoxicações [1,2]. No Brasil, o gerenciamento dos RSS é regulado por legislações específicas, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), a Resolução RDC 222/2018 da ANVISA e a Resolução CONAMA 358/2005 [3–5]. O objetivo deste trabalho é reunir informações técnicas sobre os resíduos de saúde e ressaltar as consequências do descarte incorreto para a saúde humana e o meio ambiente, promovendo a conscientização entre estudantes e profissionais da área.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo baseia-se em uma revisão técnica de legislações brasileiras, diretrizes sanitárias e artigos científicos sobre resíduos de serviços de saúde. A abordagem metodológica envolveu: - Análise documental: estudo da Lei nº 12.305/2010, da Resolução RDC 222/2018 da ANVISA e da Resolução CONAMA 358/2005. - Revisão da literatura científica: artigos publicados entre 2018 e 2024 sobre classificação de resíduos, riscos ocupacionais e impactos ambientais [2,6,7]. - Síntese comparativa: integração das diretrizes legais e recomendações técnicas em formato informativo acessível para a área.

da saúde. Não houve coleta de dados primários; todas as informações derivam de fontes normativas e bibliográficas.

3. RESULTADOS

Classificação dos resíduos de saúde:

- A legislação brasileira, especialmente a Resolução CONAMA nº 358/2005 e a RDC nº 222/2018 da ANVISA, estabelece a classificação dos resíduos de serviços de saúde (RSS) em cinco grupos principais, cada um com características próprias e riscos distintos:
- Grupo A (Biológicos): compostos por materiais que contenham ou possam conter microrganismos patogênicos, capazes de causar infecções. Incluem tecidos e órgãos humanos, sangue, secreções, excreções e culturas de laboratório. Exemplos: gazes com sangue, materiais de curativos, restos de procedimentos cirúrgicos. Representam risco elevado de transmissão de doenças como HIV, hepatite B e C, tuberculose e tétano.
- Grupo B (Químicos): abrangem substâncias perigosas devido à toxicidade, corrosividade, inflamabilidade ou reatividade. Incluem medicamentos vencidos, resíduos de desinfetantes, reagentes laboratoriais e metais pesados como mercúrio (presente em termômetros e amálgamas odontológicos). Podem causar intoxicações agudas e crônicas em trabalhadores e contaminar solos e lençóis freáticos.
- Grupo C (Radioativos): gerados em procedimentos de diagnóstico e terapia nuclear, como radioterapia e exames com radionuclídeos. Devem ser manejados com atenção especial, pois emitem radiação ionizante capaz de causar mutações genéticas, câncer e danos ambientais persistentes.
- Grupo D (Comuns): resíduos que não apresentam risco biológico, químico ou radiológico, similares ao lixo urbano. Incluem papel de escritório, embalagens, restos de alimentos e materiais recicláveis sem contaminação. Embora menos perigosos, quando misturados aos demais grupos perdem a possibilidade de reciclagem.
- Grupo E (Perfurocortantes): objetos capazes de cortar ou perfurar, como agulhas, bisturis, lâminas e vidrarias quebradas. Representam risco direto de acidentes ocupacionais e transmissão de doenças infectocontagiosas. São os principais responsáveis por notificações de acidentes de trabalho entre profissionais da saúde no Brasil.

Locais de geração dos resíduos

- A origem dos resíduos de saúde varia conforme o contexto institucional, influenciando tanto a quantidade quanto a complexidade do gerenciamento:
- Serviços de saúde: hospitais gerais e especializados, unidades de pronto atendimento (UPAs), clínicas odontológicas, laboratórios de análises clínicas, farmácias e serviços de hemodiálise. Nessas instituições, há predominância de resíduos dos Grupos A, B e E, em virtude da grande quantidade de procedimentos invasivos, uso de medicamentos e manipulação de materiais perfurocortantes. Por exemplo, em cirurgias hospitalares, há grande produção de resíduos biológicos e perfurocortantes, enquanto em farmácias e laboratórios destacam-se os resíduos químicos, como medicamentos vencidos e reagentes.
- Instituições acadêmicas: universidades, hospitais-escola, institutos de pesquisa e laboratórios de ensino. O volume total costuma ser menor que o dos serviços assistenciais, mas a diversidade é igualmente relevante. Em práticas laboratoriais de microbiologia e bioquímica, são gerados resíduos dos Grupos A, B e E; em cursos de radiologia e medicina nuclear, resíduos do Grupo C. Nessas instituições, o desafio é garantir que estudantes e pesquisadores, muitas vezes em processo de formação, realizem a segregação correta para reduzir riscos de acidentes e contaminações.

Manejo e descarte adequados

- O gerenciamento seguro dos resíduos de saúde deve seguir o princípio da segregação na fonte, ou seja, no local e momento da geração. Cada grupo exige acondicionamento e destinação específicos:
- Biológicos (Grupo A): devem ser coletados em sacos brancos leitosos resistentes, identificados com símbolo de risco biológico. São armazenados em recipientes rígidos e impermeáveis.

O tratamento recomendado é a autoclavagem (esterilização por vapor sob pressão) ou a incineração, que elimina microrganismos. Exemplo: restos de curativos hospitalares devem ser autoclavados antes da disposição final.

- Químicos (Grupo B): necessitam de recipientes rígidos, estanques e devidamente identificados. O tratamento varia conforme o tipo de substância: neutralização de ácidos e bases, encapsulamento de metais pesados e coprocessamento em fornos de cimentoparamedicamentos. O transporte deve ser feito por empresas licenciadas.
- Radioativos (Grupo C): exigem recipientes blindados, compatíveis com o tipo e nível de radiação. São armazenados em áreas controladas até que ocorra o decaimento da radioatividade a níveis seguros, seguindo normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).
- Comuns (Grupo D): podem ser descartados junto ao lixo urbano ou encaminhados para programas de reciclagem, desde que não estejam contaminados. Por exemplo, garrafas plásticas de água de uso hospitalar, sem contato com agentes biológicos, podem ser destinadas à coleta seletiva.
- Perfurocortantes (Grupo E): devem ser descartados imediatamente após o uso em caixas rígidas, resistentes a perfuração e com tampa. O destino final é geralmente a incineração, evitando o risco de acidentes com coletores e catadores. The text continues here.

4. DISCUSSÃO

O manejo inadequado dos resíduos de serviços de saúde (RSS) acarreta riscos graves à saúde humana e ao meio ambiente. Entre os principais problemas estão:

- Saúde humana: exposição de trabalhadores da saúde, pacientes e da comunidade a agentes infecciosos e tóxicos. Infecções virais como HIV, hepatite B e C, além de acidentes com perfurocortantes, representam uma das maiores causas de agravos ocupacionais no setor. A manipulação incorreta de resíduos químicos, como mercúrio e solventes, pode levar a intoxicações agudas e crônicas, incluindo efeitos cancerígenos.
- Meio ambiente: cada grupo de resíduos apresenta riscos distintos:
- Biológicos: favorecem a proliferação de vetores (moscas, ratos, baratas), contaminando o solo e a água, podendo gerar surtos locais de doenças.
- Químicos: substâncias como mercúrio, formaldeído e quimioterápicos apresentam alta toxicidade, contaminando rios, afetando organismos aquáticos e entrando na cadeia alimentar.
- Radioativos: têm efeitos prolongados, podendo comprometer o equilíbrio ecológico por décadas e exigir monitoramento constante.
- Comuns: quando misturados a resíduos perigosos, tornam-se inservíveis para reciclagem, aumentando a pressão sobre aterros sanitários.
- Perfurocortantes: além de acidentes diretos com trabalhadores da coleta, podem expor catadores informais e até a população em geral a patógenos letais.
- Diante desses riscos, algumas estratégias eficazes são indispensáveis:
- Capacitação contínua: treinamentos periódicos em biossegurança para profissionais e estudantes, reduzindo falhas no manuseio.
- Tecnologias sustentáveis: incentivo ao uso de autoclaves em substituição à incineração quando viável, reciclagem segura de materiais comuns e logística reversa para medicamentos e embalagens.
- Monitoramento ambiental: avaliação sistemática da qualidade do solo, da água e do ar nas proximidades de unidades de saúde.
- Fiscalização rigorosa: aplicação de penalidades administrativas e legais para instituições que descumprem normas, assegurando que as políticas ambientais sejam efetivamente cumpridas.
- Em síntese, a adequada gestão dos resíduos de saúde não é apenas uma exigência normativa, mas uma medida fundamental de proteção coletiva, prevenindo impactos que ultrapassam os limites das unidades de saúde e atingem toda a sociedade e os ecossistemas.

5. CONCLUSIONS

Os resíduos de serviços de saúde constituem um problema complexo que afeta simultaneamente a saúde pública e o meio ambiente. O manuseio inadequado expõe trabalhadores e comunidades a riscos graves, além de comprometer os ecossistemas. A adoção de práticas seguras de gestão, aliada a treinamento contínuo e políticas públicas eficazes, pode reduzir substancialmente os impactos negativos. O gerenciamento adequado de RSS deve ser visto não apenas como obrigação legal, mas como compromisso ético com a vida humana e a sustentabilidade ambiental.

Acknowledgments: In this section, you can acknowledge any support given which is not covered by the author contribution or funding sections. This may include administrative and technical support, or donations in kind (e.g., materials used for experiments).

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

REFERENCES

1. Brasil. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC nº 222/2018. Diário Oficial da União, Brasília, 2018.
2. Oliveira Filho, O. B. Q. de; et al. Gerenciamento dos resíduos hospitalares e a importância para a saúde humana e ambiental. Revista Caderno Pedagógico, 21(6), e4743, 2024.
3. Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, 2010. Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 358/2005. Diário Oficial da União, Brasília, 2005.
4. Ferreira, L. O.; Almeida, R. P.; Souza, M. F. Impactos ambientais do descarte inadequado de resíduos hospitalares. Revista de Saúde Pública, 56, 1–15, 2022.
5. Silveira, R. E. da; et al. O papel da vigilância epidemiológica no controle de surtos de doenças infecciosas no SUS. Revista Eletrônica Acervo Saúde, 23(6), e12797, 2023.
6. Uehara, S. C. da S. A.; Veiga, T. B.; Takayanagui, A. M. M. Gerenciamento de resíduos de serviços de saúde em hospitais de Ribeirão Preto (SP), Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental, 24(1), 121–130, 2019.

A disponibilidade do plástico em ecossistemas costeiros

Ingredy da Silva ^{1*}, Lucia Vanessa Rocha Santos ¹ e Robson Guimarães dos Santos ¹

¹ Laboratório de Ecologia e Conservação no Antropoceno – ECOA LAB / Universidade Federal de Alagoas - UFAL;
ingredy.silva@icbs.ufal.br; bioluciavanessa@gmail.com; Robsongsantos@gmail.com

* Correspondence: ingredy.silva@icbs.ufal.br

Resumo: A poluição por plástico tornou-se uma ameaça ambiental crescente devido à sua ampla produção, uso e persistência. Este estudo teve como objetivo avaliar o acúmulo de plástico em quatro ecossistemas costeiros em Maceió, Alagoas: praia arenosa, recife de coral (substrato e superfície da água) e banco de lama. A amostragem utilizou métodos específicos para cada ecossistema, incluindo transectos, imagens de drone, mergulhos livres e arrastos. Um total de 8.855 itens foram coletados, 80% destes sendo plástico. A praia arenosa apresentou o maior número de itens, seguido do banco de lama, recifes de coral e superfície da água. Os tipos de plástico variaram entre os ecossistemas, com predominância do plástico do tipo Filme. Fragmentos foram abundantes em todos os ambientes. A análise ANOSIM revelou diferenças significativas na composição do plástico entre os ecossistemas, refletindo distintos processos na deposição e fontes de entrada. Os resultados indicam que a urbanização, turismo e transporte hidrodinâmico influenciam fortemente a distribuição do plástico. Esses achados destacam a necessidade de estratégias de mitigação específicas para cada ecossistema, integrando políticas públicas, monitoramento contínuo e conscientização social para reduzir a poluição por plástico e proteger os ecossistemas costeiros e marinhos.

Palavras-chave: Poluição por plástico, recifes de corais, áreas costeiras

1. INTRODUÇÃO

A poluição por plástico se tornou uma ameaça ao nosso planeta nos últimos anos [1]. Devido ao seu baixo custo, propriedades físico-químicas e durabilidade, o plástico tem sido amplamente utilizado em toda a sociedade, tornando-se onipresente em nossas vidas e nos mais diversos ecossistemas, sendo encontrado desde a montanha mais alta do planeta as profundezas dos oceanos [1,2,3,4].

Devido à sua persistência no ambiente, com degradação natural na escala de décadas a séculos, seu acúmulo e contaminação generalizada tornou-se inevitável [5,6]. O mal gerenciamento e destinação de resíduos plásticos após seu uso, resultam em sua chegada nos diversos ambientes, causando diversos danos aos ecossistemas, bem como para as atividades econômicas e sociais, além da dispersão de metais pesados e outros poluentes [7,8]. Uma vez dentro dos ecossistemas, os processos de degradação dificultam sua identificação e remoção [8]. No Brasil, o quarto maior produtor de plástico do mundo, a ocorrência desses resíduos nos ecossistemas costeiros tem sido cada vez mais reportada [2,8,9].

Diversos estudos já demonstraram que a poluição costeira gera uma grande diversidade de impactos negativos, no entanto, ainda não se tem uma compreensão clara sobre as fontes, o transporte e a conexão destes resíduos nos diferentes ecossistemas costeiros, e tal compreensão é essencial para a identificação dos principais pontos de acumulação, origem, tipo de plástico predominante em cada ecossistema e processos de dispersão [10]. Só com essas informações conseguiremos entender os potenciais impactos e traçar políticas públicas mais efetivas para redução da poluição por plástico.

Portanto, este estudo teve como objetivo avaliar o acúmulo do plástico nos ecossistemas costeiros, identificando suas principais fontes e potenciais fatores que influenciam o seu acúmulo.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na região da Praia de Ponta Verde, localizada no litoral da zona urbana da cidade de Maceió, região costeira central do Estado de Alagoas (Região Nordeste do Brasil), entre os paralelos 09°21'31" e 09°42'49" Sul e os meridianos 35°33'56" e 35°38'36" Oeste. A avaliação do plástico foi realizada em quatro diferentes ecossistemas utilizando a tipologia de ecossistemas proposta pela *The International Union for Conservation of Nature – IUCN* [11], são eles: Praia arenosa, recife de coral (substrato e superfície da água sobre o recife e bancos de lama).

2.2 Coleta de Dados

A avaliação do plástico depositado na praia arenosa foi realizada a partir de 10 transectos de 2 m de largura e comprimento variável (mín.: 0,27 m; máx.: 35,4 m) perpendiculares à borda d'água, indo da linha de maré alta até o limite superior da faixa de areia, definido por uma barreira sólida natural ou artificial. O plástico maior que 10 cm presente na superfície da água foi avaliado por meio de imagens registradas com o auxílio do Drone DJI *Mavic 2 Zoom*, em 10 transectos de 1000 m de comprimento e 2 m de largura distribuídos sobre os recifes de coral. Os voos foram automatizados no software Drone Deploy, com duração média de 6 minutos e velocidade de 8 m/s, sendo obtidas de 100 a 103 imagens por transecto.

O plástico depositado no substrato recifal foi avaliado através de mergulhos livres em 15 transectos, com 20 m de comprimento e 2 m de largura e o plástico depositado nos bancos de lama foi avaliado a partir de arrastos de 30 minutos em uma velocidade média de 2,5 nós, utilizando uma rede de arrasto dupla de 12 metros de largura e uma malha de 20 mm, operadas em um barco de pesca, em quatro transectos na área de estudo. Após o arrasto, o plástico foi identificado e separado do material biológico para posterior quantificação.

2.3 Análise de Dados

Os itens coletados nos diferentes ecossistemas foram classificados de acordo com o material, tamanho, e possível origem, seguindo as diretrizes de Morales-Caselles (2021) [12]. Cada item foi associado a um tipo específico de material: Plástico (Espuma, Filme, Linha, Rígido e Não Identificado), Metal, Papel, Tecido, Vidro e Outros (e.g. madeira e cerâmica).

Para os itens classificados como plástico, foi realizada uma classificação adicional quanto ao tipo de plástico: Rígido (material com pouca flexibilidade), Filme (plástico flexível apresentando alta capacidade de deformação quando submetido a forças externas), Linha (plástico utilizado em produtos de uso contínuo como fios, cordas e outros materiais), Espuma plástica (plástico expandido ou aerado) e N.I para itens não identificados. A possível origem dos itens foi separada nas categorias de alimentação, fragmentos, fumo, higiene/hospitalar, outras origens, pesca e sacolas.

2.4 Análise Estatística

Para avaliar diferenças na composição do plástico entre os diferentes ecossistemas, foi aplicada a análise de Similaridade (ANOSIM), e uma representação NMDS, para a visualização dos dados, ambas utilizando o pacote *vegan* no R.

A análise ANOSIM baseou-se na matriz de dissimilaridade calculada com distância de Bray-Curtis, utilizando um teste de permutação (n=999) para determinar a significância estatística do coeficiente R.

3 RESULTADOS

3.1 Resíduos nos diferentes ecossistemas

Um total de 8.855 itens foram coletados nos diferentes ecossistemas descritos neste estudo. Destes, mais de 80% foram classificados como plástico, um total de 7.483 itens (Praia arenosa = 6.002 itens, Recife de coral = 366 itens, Superfície da água = 192 itens e Banco de lama = 923 itens).

Plásticos do tipo Filme, Linha e Rígido apresentaram porcentagens semelhantes na Praia arenosa, com apenas 6,9% deles sendo classificados com Espuma (Figura 1). Das categorias de possível origem aplicadas aos itens, Fragmentos e Alimentos foram os mais representativos neste ecossistema, seguidos de itens com origens classificadas como Fumo, Pesca e Sacolas (Figura 2). No Recife de coral, plástico dos tipos Filme e Rígido foram os que mais se destacaram, e assim como

na Praia arenosa, itens fragmentados e de origem alimentícia foram prevalentes nesse ecossistema.

A superfície da água obteve alta porcentagem de itens Não Identificados quanto ao tipo de plástico (N.I. = 81%), seguido dos tipos Filme e Rígido. Quanto a sua origem, 83% dos itens tiveram a origem classificada como Fragmento, seguido de itens de origem pesqueira, diferindo dos ecossistemas anteriores. Nos bancos de lama, plásticos do tipo Filme apresentaram a maior porcentagem de itens com 81,65%, seguidos de plásticos do tipo Linha e Rígido. Quanto a sua origem, itens fragmentados e sacolas obtiveram juntos 82,96% da amostragem seguido de itens de origem alimentícia e pesqueira (Figura 2).

Na praia arenosa, bitucas de cigarro, embalagens e descartáveis somaram, juntos, 53,44% do material coletado, enquanto no recife de coral embalagens e sacolas se destacaram (12,56% e 11,74%, respectivamente). Já na superfície da água, além dos itens fragmentados encontrados em 83% das amostras, embalagens e fibras sintéticas somaram juntas cerca de 12%. No banco de lama, as sacolas foram dominantes (26,35%), refletindo fontes distintas de poluição nesses ecossistemas.

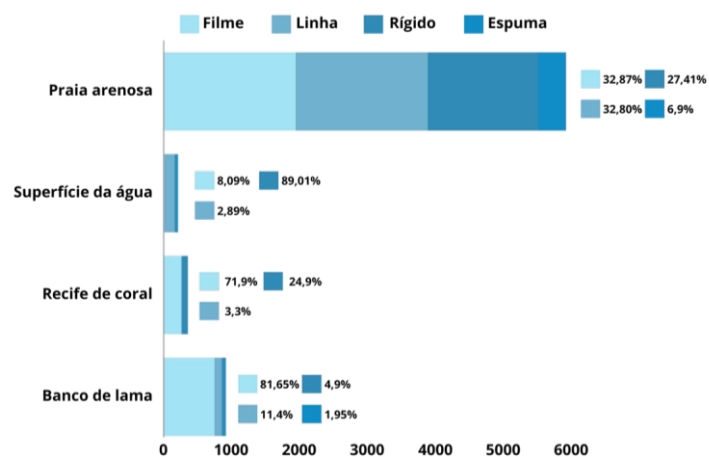


Figura 1. Os diferentes tipos de plástico encontrados na praia arenosa, recife de coral, superfície da água e banco de lama. As barras empilhadas apresentam os tipos de plástico em porcentagens.

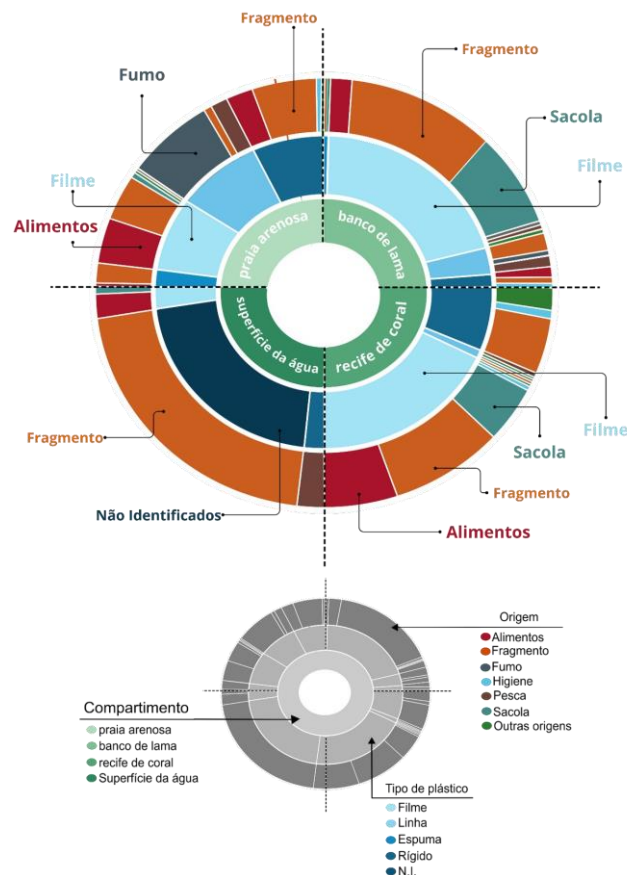


Figura 2. Caracterização do plástico nos diferentes ecossistemas analisados. Cada anel apresenta

4 segmentos, representando cada ecossistema analisado. De dentro para fora, os anéis representam o tipo de plástico e a possível origem dos itens coletados e os tamanhos representam as contagens dos itens em cada ecossistema.

3.3 A similaridade do plástico nos diferentes ecossistemas

Os resultados obtidos a partir do teste ANOSIM realizado para os tipos de plástico revelam uma diferença significativa entre os ecossistemas analisados ($R = 0.483$; $p = 0.001$; NMDS stress = 0.0843), o que indicou que as amostras dentro de cada ecossistema são consideravelmente mais similares entre si do que quando comparados entre eles. O gráfico NMDS (Figura 3) reforça os resultados obtidos no teste ANOSIM, demonstrando uma clara separação entre os grupos representados pelos diferentes ecossistemas. Essa segregação visual reflete a diferença nos padrões de acumulação de plástico em cada ecossistema, sugerindo que os processos que contribuem para a deposição do plástico nestes ambientes não são os mesmos.

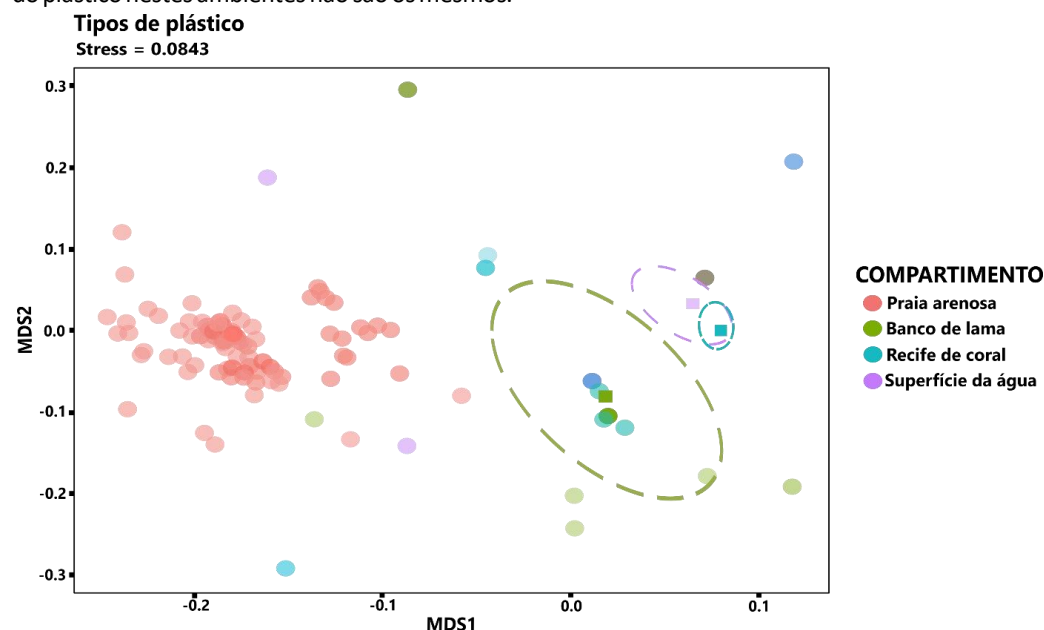


Figura 3. Gráfico de Escalonamento Multidimensional Não-Métrico (NMDS) demonstrando a diferença entre o tipo de plástico nos ecossistemas analisados.

4 DISCUSSÃO

O plástico foi o resíduo antropogênico mais abundante em todos os ecossistemas analisados e sua prevalência pode estar relacionada as altas taxas de produção e sua persistência no ambiente [13,14].

O plástico do tipo Filme foi prevalente no recife de coral e bancos de lama, sendo semelhante em prevalência aos outros tipos na praia arenosa, devido à grande diversidade presente nesse ecossistema, e o segundo maior na superfície da água, como demonstrado em outros estudos [12, 15, 16]. Esse tipo plástico é formado principalmente por sacolas, embalagens e descartáveis de uso único [17], principais itens coletados em todos os ecossistemas deste estudo e suas associadas a urbanização e alta atividade turística que ocorre na área de estudo [18]. Embalagens, sacolas e outros plásticos leves podem ser transportados por longas distâncias pelos ventos quando depositados incorretamente nas faixas de areia, indo para as superfícies da água [12].

Para todos os tipos de plástico relatados nesse estudo, itens fragmentados foram os mais abundantes em todos os ecossistemas. Isso se dá principalmente pela ação de forças externas que ocasionam a degradação rápida do plástico nos ecossistemas [12, 17].

Além de itens fragmentados prevalentes em todos os ecossistemas, as demais origens diferiram de forma considerável. Sacolas inteiras e seus fragmentos foram abundantes no recife e no banco de lama, enquanto itens categorizados como fumo obtiveram altas taxas na praia arenosa. A diferença de origem pode mostrar que a entrada do plástico nos diferentes ecossistemas se dá de maneira distinta. A praia arenosa é o principal sumidouro de resíduos, mais de um terço do plástico fica encalhado na costa onde se origina devido à grande exposição as múltiplas fontes de poluição [19]. Tais fontes fazem com que este ecossistema receba uma

quantidade maior e mais frequente de resíduos em contraste a outros ecossistemas. A partir da ação dos ventos e das correntes os resíduos flutuantes chegam à superfície da água advindo de outros locais e ao afundarem, estes itens podem ser sobrecarregados por sedimentos, permanecendo presos no fundo [20].

5 CONCLUSÃO

A análise de resíduos nos diferentes ecossistemas evidencia a predominância do plástico como principal resíduo encontrado, especialmente do tipo Filme. Além disso, a fragmentação desses resíduos reforça a persistência desse poluente nos ecossistemas. A distinção na sua composição entre os diferentes ecossistemas sugere que estratégias diferenciadas de mitigação devem ser adotadas em cada ambiente. A gestão eficaz da poluição por plástico requer esforços integrados entre políticas públicas, monitoramento contínuo e conscientização da sociedade, visando à preservação dos ecossistemas marinhos e costeiros.

Financiamento: Essa pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), bolsa número 405449/2022-4 (CNPq/MCTI-FNDCT CT-Petro N 43/2022) e processo de produtividade em pesquisa nº 312099/2023-1.

Conflitos de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesses.

REFERENCES

- BORRELLE, Stephanie B. et al. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science*, v. 369, n. 6510, p. 1515-1518, 2020.
- LAW, Kara Lavender. Plastics in the marine environment. *Annual review of marine science*, v. 9, p. 205-229, 2017.
- LAU, Winnie WY et al. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, v. 369, n. 6510, p. 1455-1461, 2020.
- ZHANG, Shaoliang et al. Microplastic migration and distribution in the terrestrial and aquatic environments: A threat to biotic safety. *Journal of environmental management*, v. 333, p. 117412, 2023.
- DE VITA, Riccardo Luciano; GIANNUZZI, Anna Giunone. Plastic marine pollution. *Prosperitas*, v. 6, n. 3, p. 23-33, 2019.
- MACLEOD, Matthew et al. The global threat from plastic pollution. *Science*, v. 472 373, n. 6550, p. 61-65, 2021.
- Rio, G. P. do. (2018). Mares e oceanos: novas fronteiras da regulação territorial? *Revista Brasileira de Geografia*, 63(1), 61–72. https://doi.org/10.21579/issn.2526-0375_2018_n1_p61-72
- MATIAS, Tális Pereira et al. Plásticos em ecossistemas costeiros brasileiros: ocorrência e impactos na fauna marinha. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 11, p. e208111133329-e208111133329, 2022.
- SOROLDONI, Sanye et al. Antifouling paint particles: sources, occurrence, composition and dynamics. *Water research*, v. 137, p. 47-56, 2018.
- WINDSOR, Fredric M. et al. A catchment-scale perspective of plastic pollution. *Global change biology*, v. 25, n. 4, p. 1207-1221, 2019.
- KEITH, David A. et al. IUCN Global Ecosystem Typology 2.0: descriptive profiles for biomes and ecosystem functional groups. 2020.
- MORALES-CASELLES, Carmen et al. An inshore–offshore sorting system revealed from global classification of ocean litter. *Nature Sustainability*, v. 4, n. 6, p. 484-493, 2021.
- MARTYNOVA, Anastasiia et al. Density and distribution patterns of seafloor macrolitter in the eastern Red Sea. *Science of The Total Environment*, v. 953, p. 176042, 2024.
- PORTMAN, Michelle E.; BRENNAN, Ruth E. Marine litter from beach-based sources: Case study of an Eastern Mediterranean coastal town. *Waste Management*, v. 69, p. 535-544, 2017.
- MANULLANG, Corry Yanti et al. Distribution of plastic debris pollution and its implications on mangrove vegetation. *Marine Pollution Bulletin*, v. 160, p. 111642, 2020.
- ALVARADO-ZAMBRANO, Daniela; RIVERA-HERNÁNDEZ, José R.; GREEN-RUIZ, Carlos. Macroplastic and Microparticle Pollution in Beach Sediments from Urias Coastal Lagoon (Northwest Mexico). *Toxics*, v. 12, n. 6, p. 439, 2024.
- LAZCANO, Raúl F.; VINCENT, Anna ES; HOELLEIN, Timothy J. Dança do lixo: Lixo antropogênico e matéria orgânica coacumulam-se em praias urbanas. *Geosciences*, v. 10, n. 9, p. 335, 2020.
- MOURA, MARILIA MEDEIROS et al. O AMBIENTE FÍSICO E SOCIAL COMO UM DETERMINANTE DA SAÚDE URBANA. Diagnóstico de situação de espaços verdes no bairro de Ponta Verde. Maceió/AL. *Caderno de Graduação-Ciências Humanas e Sociais-UNIT-SERGIPE*, v. 6, n. 1, p. 65-65, 2020
- PASQUINI, Giulia et al. Seabed litter composition, distribution and sources in the Northern and Central Adriatic Sea (Mediterranean). *Waste management*, v. 58, p. 41-51, 2016.
- Lebreton L, Egger M, Slat B. Um orçamento de massa global para detritos macrolásticos positivamente flutuantes no oceano. *Sci Rep*. 2019.

ALGA NÃO É LIXO, É LUXO

ÉLICA GUEDES ¹, THAUANE BARBOSA ², IAN SANTOS ², GIOVANNA DOS ANJOS ², ROBERTA LOBO ², BRUNO SOARES³

¹Laboratório de Ficologia/LABOFIC, Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde/ICBS, Universidade Federal de Alagoas/UFAL.

²Alunos de graduação e estagiários do Laboratório de Ficologia/LABOFIC, Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde/ICBS, Universidade Federal de Alagoas/UFAL

³INSTITUTO PRO ALGA BRASIL- Diretor de Cooperativismo e Relações Sociais/UFPA

*elica.guedes@icbs.ufal.br

Abstract: Algae are autotrophic and photosynthetic organisms that play an essential role in various ecosystems, contributing to the balance of the planet's carbon dioxide and oxygen cycles. They are divided into microalgae and macroalgae. Macroalgae are classified as Chlorophyta (green algae), Ochrophyta (brown algae), and Rhodophyta (red algae). They are used in human and animal food, medicine, nutraceuticals, fertilizers, and other applications. This work is part of an Outreach Project aimed at conducting activities with students from public and private elementary and high schools, showcasing the importance of algae and their various uses. The project is held in schools or at the UFAL botany laboratory and includes lectures, tastings of algae-based products, and recreational activities where students participate in competitions, with the winning team receiving gifts of algae-based products. At the end of the activities, it is possible to observe the satisfaction that the school students demonstrate in being in the university environment and being able to learn about the world of algae, which for many is considered trash.

Keywords: Macroalgae, Extension, School, Importance.

1. INTRODUÇÃO

As algas são organismos autótrofos e fotossintetizantes que diferem das plantas por não formarem tecidos nem órgãos ordenados, ou seja, não apresentam uma estrutura dividida em raiz, caule e folhas. Podem ser unicelulares ou pluricelulares. O corpo de uma alga multicelular é chamado de talo. Habitam ambientes terrestres úmidos ou meios aquáticos, de água doce ou salgada. São seres importantes para todos ambientes em que elas vivem. Diante de sua diversidade e riqueza, tiveram participação no processo evolutivo dos organismos autotróficos, em relação ao equilíbrio da concentração de gás carbônico e oxigênio na atmosfera e no surgimento das plantas [1]. Além disso, são de fundamental importância na área econômica, uma vez que servem como matéria-prima para a fabricação de vários produtos (alimentares, farmacêuticos, medicinais, dentre outros) [2, 3]. No entanto, muitas pessoas acreditam que algas não servem para nada, principalmente quando se deparam com elas em nossas praias. Ali, as pessoas acreditam que a praia está “poluída”, chegando mesmo a confundir esses seres tão importantes com lixo. Em muitos países, principalmente no Oriente, as algas fazem parte da alimentação diária [4] São fonte de proteínas, vitaminas e sais minerais. Entre os grupos mais consumidos estão as algas vermelhas (Rhodophyta) e as pardas (Ochrophyta/Phaeophyceae), que podem ser cultivadas em viveiros ou simplesmente coletadas no ambiente marinho [5]. Algumas das algas comestíveis mais conhecidas são o *nori*, utilizado pelos japoneses no preparo do sushi, o *kombu* e o *wakame*, duas algas que fazem parte de pratos chineses e japoneses, como sopas, molhos e carnes. As algas também podem ser encontradas entre os ingredientes de rações para animais. Muitos alimentos utilizados na pecuária possuem como base uma farinha feita de algas desidratadas e moídas [6]. Sendo assim, este trabalho faz parte de um projeto de extensão denominado “Alga não é lixo, é luxo” cujo objetivo é mostrar como as algas podem ser utilizadas no cotidiano, uma vez que são tratadas como lixo e que não possuem nenhuma utilização.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de extensão “Alga não é lixo, é luxo” realizou atividades com escolas de ensino fundamental e médio, tanto nas escolas como no Laboratório de Botânica da UFAL. Os alunos foram recepcionados nas dependências do ICBS e levados ao Laboratório de Botânica onde, inicialmente de forma didática, receberam conhecimentos sobre características gerais e importância econômica dos filamentos de algas microscópicas e macroscópicas. Após apresentação teórica, os alunos foram apresentados aos diversos tipos de algas, suas formas de comercialização e utilização. Posteriormente, tiveram oportunidade de visualizar e degustar produtos preparados e comercializados com algas (Fig. 1). Em um segundo momento, os estudantes foram divididos em equipes que participaram de atividades lúdicas relacionadas as algas como: Jogo da memória com algas (Memoalgas), Quebra-cabeça (Quebra-algas), Caça-palavras, Quiz e Ficodado (Fig. 2).

3. RESULTADOS

Os filamentos das algas foram distribuídos entre os discentes que faziam apresentações sobre suas mais diversas formas, cores, tamanhos e constituição. Para a apresentação de importância econômica, foi enfatizado que tanto as microalgas como as macroalgas fazem parte do nosso cotidiano com sua importância ecológica na alimentação, indústria farmacêutica e de cosméticos, bem como diversas formas de cultivo destes organismos. Durante a atividade do projeto foram preparadas e apresentadas lâminas com microalgas para que os estudantes pudessem visualizar no laboratório as algas microscópicas, incluindo as de importância econômica como *Spirulina* sp. (cianobactéria), *Chlorella* sp. (Chlorophyta) e terra de Diatomáceas. Também foi exposta em uma bandeja, algas arribadas onde os estudantes faziam uma breve triagem para separar os grupos de algas vermelhas, verdes e pardas fazendo distinção do que era alga e o que era lixo. Foram organizadas equipes para participar de uma gincana com um “quiz” onde respondiam varias perguntas relativas as apresentações orais sobre as algas, bem como, atividades lúdicas com os jogos (Fig. 3). A equipe vencedora da gincana recebeu um kit com vários produtos a base de alga. Também foi realizado um sorteio de uma camiseta do projeto.



Figura 1. Lista de figuras. (a) Recepção aos estudantes; (b) Apresentação dos filamentos das algas pelos discentes do projeto; (c) Observação das algas ao microscópio; (d) Degustação com produtos à base de algas; (e) Apresentação e separação de algas arribadas e lixo; (f) Produtos produzidos à base de algas.



Figura 2. Lista de figuras. (a-b) Quebra-cabeça (Quebra-algas); (c-d) Ficodado; (e-f) Jogo da memória com algas (Memoalgas); (g) Caça-palavras.



Figura 3. Lista de figuras. (a) Quiz; (b) Visualização de algas e participação dos jogos; (c) Jogo do Ficodado; (d) Degustação de algas; (e) Alunos participando dos jogos; (f) Camiseta sorteada do projeto.

4. CONCLUSÃO

O projeto “Alga não é lixo, é luxo” levou o conhecimento das algas para alunos de escolas públicas e privadas, abordando sua importância social, econômica, como bioindicador, sua relevância na natureza bem como na saúde dos seres vivos estando presentes na indústria econômica, uma vez que servem como base para vários produtos alimentares, farmacêuticos, medicinais, cosmética, indústria têxtil, entre outros setores. Com isso, foi possível compreender a importância da aplicação de projetos de extensão dentro do contexto escolar e de sala de aula no ensino de Ciências e Biologia para a educação básica, pois através deles os estudantes se sentem mais atraídos pelo conhecimento científico, tendo assim, um maior desenvolvimento no aprendizado entendendo que o que vem do mar não é lixo.

REFERÊNCIAS

1. RAVEN, P.H., EVERT, R.F., EICHHORN, S.E. *Biologia vegetal*. Editora Guanabara Koogan, 7a ed. São Paulo, 2007. 701p.
2. QUITRAL, R., V., MORALES G., C., SEPULVEDA, L., M., et al. Propiedades nutritivas y saludables de algas marinas y su potencialidad como ingrediente funcional. *Revista Chilena de Nutricion*, v. 39, n. 4, p. 196-202, 2012.
3. VASCONCELOS, B. M. D. F., GONÇALVES, A. A. Macroalgas e seus usos – alternativas para as indústrias Brasileiras. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 8, n. 5, p. 125–140, 2013.
4. ROCHA, A., M.; GONDIM, F., A. Algas arribadas da Praia do Pacheco, Ceará. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 15, nº. 2, 2020, págs. 208-214. ISSN-e1981-8203.

-
5. CAVALCANTI, M. I. L. G.; SÁNCHEZ, P. M. G. & FUJII, M. T. Comparison of the diversity and biomass of beachcast seaweeds from NE and SE Brazil. *European Journal of Phycology*, 2022. Doi.org/10.1080/09670262.2021.2003867.
 6. SILVA, V. L. M. M.; MEDEIROS, K. M. S. de; LIMA, L. M. R.; LIMA, L. M. R. Use of "arribadas" algae from the coast of Paraíba to remove gasoline from water bodies. *Brazilian Journal of Development*, 2021. DOI:10.34117/bjdv7n9-539.

Assessment of the spatial distribution and quantification of microplastics in the Parnaíba Delta

Sabrina Duarte Alencar¹, Gabriella Braga Feitosa¹, Marcella Araújo Macêdo², Jorge Marcell Coelho Menezes³, Celme Torres Ferreira da Costa⁴, Francisco José de Paula Filho⁴

¹ Undergraduate in Materials Engineering - Federal University of Cariri (UFCA); sabrina.alencar@aluno.ufca.edu.br; braga.gabriella@aluno.ufca.edu.br

² Master's student in the Postgraduate Program in Sustainable Regional Development (PRODER) – Federal University of Cariri (UFCA); marcella.macedo@aluno.ufca.edu.br

³ Laboratory Technician at the Analytical Laboratory – Federal University of Cariri (UFCA); jorge.menezes@ufca.edu.br

⁴ Permanent Professor of the Graduate Program in Sustainable Regional Development (PRODER) – Universidade Federal do Cariri (UFCA); celme.torres@ufca.edu.br; francisco.filho@ufca.edu.br (Advisor)

* Correspondence: francisco.filho@ufca.edu.br; (88) 99782-1278

Abstract: Once plastics enter the environment, they undergo a process of fragmentation and degradation, producing smaller particles known as microplastics, ranging in size from 0.001 to 5 mm. This study evaluated the presence and characteristics of microplastics (MPs) at five different points in the Parnaíba Delta, combining quantitative and qualitative analyses. Sampling took place in areas with varying levels of anthropogenic influence, followed by processing and microscopic analysis in the laboratory. The results revealed the presence of microplastics at the analyzed points, with a greater number of brown fragments. These findings reinforce the urgent need for public policies and mitigation measures, continuous monitoring, and awareness-raising among local communities to reduce the entry of these pollutants into estuaries.

Keywords: Microplastics; Estuary; Human activities.

1. INTRODUCTION

Microplastic pollution has only recently attracted attention, being recognized as ubiquitous in the environment, recorded on all continents and in all types of ecosystems [1-2].

Microplastics (MPs) are plastic particles ranging in size from 0.001 to 5 mm [3]. These particles come in a wide range of colors and shapes [4] and reach water resources through anthropogenic activities, such as improper disposal of untreated effluents or through the improper disposal of solid waste.

When MPs come into contact with river systems, they tend to float on the surface or settle, depending on physical and environmental factors, such as particle density, the encrustation of organic matter and microorganisms on their surface, and even the volume and current of water bodies. Although numerous studies on the presence and abundance of microplastics in aquatic environments are available, information on their occurrence in estuarine sediments is still limited. Estuaries can be areas where plastics pass into the marine environment or are retained in sediments [5-6].

This study aimed to investigate the presence of microplastics at sites in the Parnaíba Delta, seeking to identify their distribution, morphology, and how they relate to the physical and chemical parameters of the water.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Sampling and physicochemical measurements

The Parnaíba Delta is an ecosystem home to significant biodiversity and is composed of a network of islands, channels, and mangroves, with significant ecological, economic, and social importance [7].

Surface sediment sampling was conducted in December 2024, during the region's dry season, during spring tide, with a depth variation between 0.2 m at low tide and 3.1 m at high tide. Sampling occurred at five points distributed throughout the Delta's main estuarine channels, located within the extractive reserve area (P1, P2, P3, and P5) and under the anthropogenic influence of the city of Luis Correia, Piauí (P4) (Figure 1). Samples were collected using a stainless steel Ekman dredge and stored in glass jars.

The physical-chemical variables of the water (pH, dissolved oxygen - DO, oxygen saturation - OD%, electrical conductivity - EC, dissolved solids - STD, Turbidity - NTU, temperature - T°C and salinity - S) were monitored in situ using multiparametric probes. Research manuscripts reporting large datasets that are deposited in a publicly available database should specify where the data have been deposited and provide the relevant accession numbers. If the accession numbers have not yet been obtained at the time of submission, please state that they will be provided during review. They must be provided prior to publication.

Interventionary studies involving animals or humans, and other studies that require ethical approval must list the authority that provided approval and the corresponding ethical approval code.

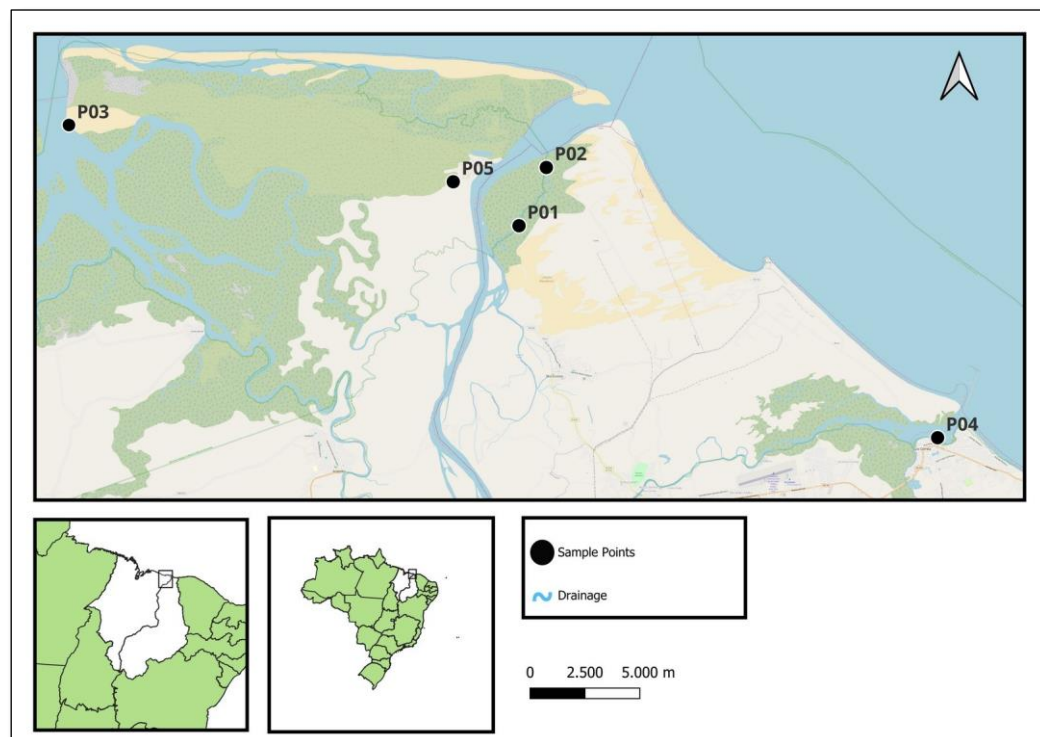


Figure 1. Location of sediment sampling points in the Parnaíba River Delta. RCE

2.2. Analytical procedures

To characterize the samples physically, gravimetric analysis of the sediments was performed according to the procedures established by NBR 10.664/1989 [7], determining moisture (H), total solids (TS), fixed solids (TSF), and volatile solids (TSV).

Sample preparation for MP quantification was adapted from the literature [8-12]. MP classification considered particle color and shape. Quantitative analysis involved separating 40.0000 g of dry, sieved sediment and subjecting it to digestion of organic matter using 20.0 mL of hydrogen peroxide (H_2O_2 , 35%) and a catalyst solution (FeSO_4) applied simultaneously. Digestion continued until the organic matter was completely removed, characterized by the absence of effervescence.

After digestion, the samples underwent densimetric separation using a zinc chloride (ZnCl_2) solution with a density of 1.5 g/cm³. They were then transferred to test tubes and allowed to settle. After 24 hours, the supernatant was filtered through 0.45- μm membranes to retain particles. The filters were analyzed using an IONLAB ECZ-BRACK stereomicroscope for detection, counting, and morphological characterization of microplastic particles. The identified particles were classified according to their morphology and color.

3. RESULTS

3.1. Qualitative Procedure

Table 1 presents the values of the physical-chemical variables monitored during the campaign. The average pH during the campaign was 7.4 ± 0.72 , with P03 and P04 presenting more alkaline values, reflecting the strong marine influence in the region. DO concentrations were around 4.9 ± 0.6 mg/L, with a predominance of values above 5.0 mg/L, characterizing satisfactory conditions for aquatic life. However, in P5, a value below 4.0

mg/L may be related to the natural oxidation process of organic matter from the mangrove areas that predominate in the main channel of the Parnaíba River [13-16].

Table 1. Hydrochemistry of the estuarine waters of the Parnaíba River delta.

P5	P4	P03	P02	P01	
7.23	8.11	8.08	6.75	6.59	pH
3.89	5.08	5.51	4.75	5.06	OD (mg/L)
50.9	77.8	86	64	66	OD (%)
1634	43.07	50.75	7100	905	EC (microS/cm)
817	21450	25370	3567	450	STD
59	7.7	15	150	75	NTU
29.06	29.94	29.5	29.49	29	T°C
1	31.5	37.5	4.4	0.5	S (ppmil)

EC and STD were higher in P03 and P04, indicating a strong marine influence due to the greater marine forcing related to spring tides, as well as the lower freshwater supply to the estuary due to the dry season [17]. Turbidity was high in P02, which may be related to greater water turbulence near the mouth of the Parnaíba River.

Solids analysis revealed significant contrasts in TS, TSF, and TSV contents between the sampling sites. Figure 2 shows the percentages of solid fractions and moisture in the samples.

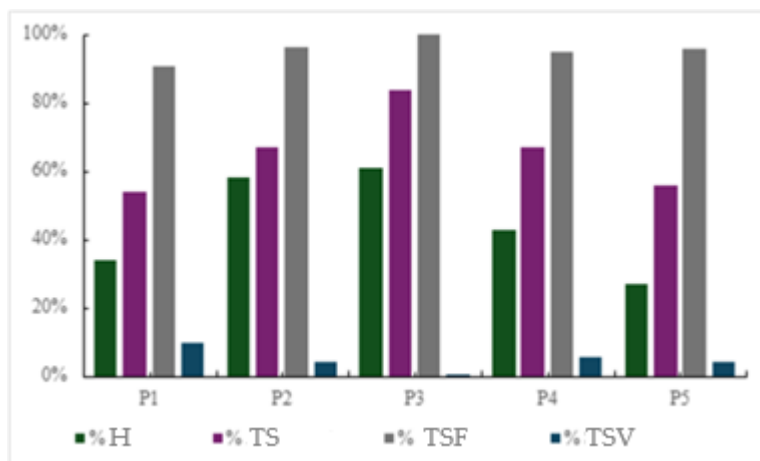


Figure 2. Solid Sediment Analysis.

ST varied between 55.6% (P05) and 83.7% (P03), suggesting a higher load of mineral sediments or organic matter for P03. In contrast, sample P05 presented more diluted characteristics, with less solid accumulation. TSF varied between 90.52% (P1) and 99.72% (P03). The high SF values corroborate the depositional characteristics inherent to a deltaic environment, where inorganic sediment retention processes, due to hydrodynamics, are favored. On the other hand, volatile solids (VS) varied between 2.3% (P03) and 9.5%, with emphasis on (P01), located in a sheltered channel (Gamboa), with dense mangrove forests. Therefore, this result corroborates natural sources of organic matter [18]. In general, the results indicated that the evaluated sediments have a predominance of minerals and a low presence of organic matter, originating mainly from the adjacent mangrove areas.

3.2. Characterization and quantification of MPs

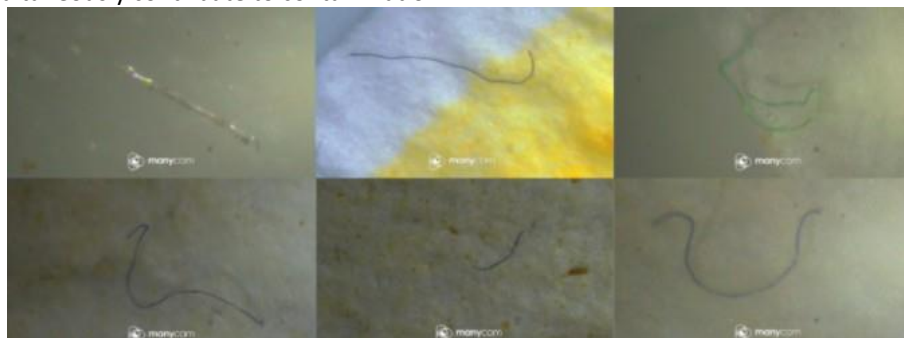
The samples were prepared and analyzed under a microscope. This step allowed for the visualization and identification of microplastic particles, and a manual count and characterization of the MPs detected were performed.

Quantitative analysis of the collected samples revealed the presence of MPs at all sampling sites, with varying quantities and characteristics. Among the identifiable forms, fibers predominated, accounting for 100% of the MPs detected.

Table 2. Morphology of microplastics in sediments from the Parnaíba River delta estuary.

(%)	Cor	(%)	Forma
50.00	Incolor	100.00	Fibra
42.86	Azul		
7.14	Verde		

The fibers present elongated morphology, reduced diameter and variable coloration, typical aspects of polymeric materials from domestic discharges or wear of synthetic materials such as fishing nets, reinforcing the hypothesis that urban and fishing sources simultaneously contribute to contamination.

**Figure 3.** Morphology of microplastics detected in sediments from the Parnaíba River delta.

4. DISCUSSION

The results obtained through the qualitative and quantitative approaches demonstrate that MPs are present at all analyzed sites. The images obtained revealed the influence of environmental factors (temperature, sunlight, and hydrochemistry) on the morphology of the fragments. The dispersion of fragments in more protected areas of the estuary, under low anthropogenic influence, such as in P05, demonstrates that MP contamination spreads to more distant areas, not restricted to those areas under greater anthropogenic influence (P04). The predominance of fibers may be related to fishing nets, mainly artisanal ones, found in the Parnaíba River Delta Environmental Protection Area, or even to the wear and tear of synthetic fabrics caused by domestic effluent discharges from upstream urban centers.

Furthermore, plastic polymers can exhibit different colors, whether original to their manufacture or modified through weathering processes [19-20]. Among the findings, colorless fibers were predominant (50%). This result corroborates the information that fishing activities in the region contribute significantly to the MPs input at the analyzed sites, followed by blue fibers. Particles with this color are frequently found in studies of this nature. This may be linked to the fact that blue dyes (indigo) used by the textile industry are more stable and resistant to degradation, meaning that fibers with this color maintain their original characteristics longer. Green fibers were detected at a single sampling site (P04), indicating a point source of pollution.

The diversity in MPs characteristics, at different levels of anthropogenic activity, shows that in more isolated locations, they presented lower quantities, but were still not free of contamination, suggesting the transport of these materials over long distances by ocean currents or wind.

5. CONCLUSIONS

The results of this study indicate the presence of microplastics in the estuarine region, although their origins could not be precisely determined. Qualitative and quantitative investigations at the five sampling points in the Parnaíba Delta revealed the presence of MPs at all sampling sites, even those in more isolated areas within the APA.

The qualitative and quantitative analysis allowed us to understand how these particles fit into socio-environmental dynamics. Locations with greater tourist flow or proximity to urban areas showed more intense signs of anthropogenic activity, while more isolated locations exhibited lower concentrations, but are still not free of the presence of MPs. In the quantitative analysis, fibers stood out as the predominant form, with elongated morphology, reduced diameter, and different colors, associated with artisanal fishing practices within the APA.

This study confirmed the ubiquitous presence of emerging contaminants (MPs), even in environments with little anthropogenic activity. It is clear that contamination by MPs is a cross-cutting problem, requiring continuous monitoring and the need for effective public policies capable of protecting the health of this heritage.

Funding: This research was funded by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Universal Proc. Nº 409820/2023 – 7, INCT-TMCOcean Proc. Nº 405765/2022-3 e PQ Proc. Nº 316615/2023-4) and FUNCAP.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analysis, or interpretation of the data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

REFERENCES

- CHEN, H.L. et al. Microplastic concentrations in river water and bed sediments in a tropical river: implications for water quality monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, n. 2, 18 jan. 2023.
- Duong, T. T., Le, P. T., Nguyen, T. N. H., Hoang, T. Q., Ngo, H. M., Doan, T. O., Le, T. P. Q., Bui, H. T., Bui, M. H., Trinh, V. T., & Nguyen, T. L. (2022). Selection of a density separation solution to study microplastics in tropical riverine sediment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2), 1–17.
- Mohana, A. A., Rahman, M., Sarker, S. K., Haque, N., Gao, L., & Pramanik, B. K. (2022). Nano/microplastics: fragmentation, interaction with co-existing pollutants and their removal from wastewater using membrane processes. *Chemosphere*, 309, 136682. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136682>.
- Rochman, C. M., Brookson, C., Bikker, J., Djuric, N., Earn, A., Bucci, K., Athey, S., Huntington, A., McIlwraith, H., Munno, K., Frond, H., Kolomijeca, A., Erdle, L., Grbic, J., Bayoumi, M., Borrelle, S. B., Wu, T., Santoro, S., Werbowski, L. M., Zhu, X., Giles, R. K., Hamilton, B. M., Thaysen, C., Kaura, A., Klasios, N., Ead, L., Kim, J., Sherlock, C., Ho, A., & Hung, C. (2019). Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38, 703–711. <http://dx.doi.org/10.1002/etc.4371>.
- Browne MA, Galloway TS & Thompson RC (2010) Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines. *Environmental Science & Technology*, 44: 3404–3409. DOI: 10.1021/es903784e.
- Lebreton LCM, van der Zwet J, Damsteeg JW, Slat B, Andrady AL & Reisser J. (2017) River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8: 15611. DOI: 10.1038/ncomms15611
- ABNT. NBR 10.664:1989. Águas – Determinação de resíduos (sólidos) – Método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1989.
- CHEN, H. L., SELVAN, S. B., TING, K. N., GIBBINS, C. N. Microplastic concentrations in river water and bed sediments in a tropical river: Implications for water quality monitoring. *School of Environmental and Geographical Sciences*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10856-5>
- [14] GHANBARI, N., FATAEI, E., NAJI, A., IMANI, A. A., NASEHI, F. Microplastic pollution in sediments in the urban section of the Qara Su River, Iran. *Applid Water Science*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01712-5>
- [15] DUNG, V. L., DUC, T. H., LINH, L. T. K., LY, T. T. D., DUONG, H. A., HAO, N.T. M. Depth profiles of microplastics in sediments cores from two mangrove forest in northern Vietnam. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2018, v. 9, p. 1381. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9121381>
- [16] XU, Q., XING, R., SUN, M., GAO, Y., AN, L. Microplastic in sediments from an interconnected river-estuary region. *Science of the Total Environment*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139025>
- [17] JAHAN, S., STREZOV, V., WELDEKIDAN, H., KUMAR, R., KAN, T., SARKODIE, S. A., HE, J., DASTJERDI, B., WILSON, S. P. Interrelationship of microplastic pollution in sediments and oysters in a seaport environment of the eastern coast of Australia. *Science of the Total Environment*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.13924>
- Rochman, CM (2018). Pesquisa de microplásticos –do sumidouro à fonte. *Ciência*, 360:28–29. Doi: 10.1126/science.aar7734.
- SPERLING, M. V. Introdução a qualidade das água e ao tratamento de esgoto. Belo Horizonte. Ed. DESA/UFMG, p. 452, 2005a.
- KRISTENSEN, E.; BOUILLON, S.; DITTMAR, T.; MARCHAND, C. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic botany*, v.89, p. 201–219, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.005>
- Jadoski, S.O.; Saito, L.R.; Prado, C.; Lopes, E.C.; Sales, L.L.S.R. 2010. Characteristics of the Nitrate leaching in intensive farming areas. *Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, 3, 193–200. DOI: <https://doi.org/10.5777/paet.v3i1.1008>
- ESTEVES, F. A. Fundamentos de Limnologia. Interciência, Rio de Janeiro. 1998, p. 602.
- Apêndice D Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade 1 Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas 1.1 Variáveis Físicas 1.1.1 Cor. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguasinteriores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/Ap%C3%AAndice-D-Significado-Ambiental-e-Sanit%C3%A1rio-das-Vari%C3%A1veis-de-Qualidade.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2025.
- FREE, C. M. et al. High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. *Marine Pollution Bulletin*, v. 85, n. 1, p. 156–163, ago. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.001>
- ZHAO, K. et al. Separation and characterization of microplastic and nanoplastic particles in marine environment. *Environmental Pollution*, v. 297, p. 118773, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118773>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Avaliação da Qualidade da Água do Riacho Pau d'Arco como Indicador de Impactos Antrópicos em Bacia Urbana

Fernando Silva de Carvalho¹ e Carlos Alberto Inacio da Silva²

¹ Centro Universitário CESMAC; fernando.carvalho@cesmac.edu.br

² calberto.eng07@gmail.com

* Correspondence: Fernando.carvalho@cesmac.edu.br; Tel.: (82)99119-5942

Resumo: Este estudo avaliou a qualidade da água do Riacho Pau d'Arco, localizado em Maceió (AL), como indicador de impactos antrópicos em bacia urbana. Duas campanhas de monitoramento foram realizadas em julho e agosto de 2021, em condições de tempo seco, para análise de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. Os resultados revelaram níveis críticos de oxigênio dissolvido (1,2 mg/L em julho), demanda bioquímica de oxigênio persistentemente elevada (15–21 mg/L) e concentrações de coliformes fecais superiores a 160.000 UFC/100 mL, indicando forte poluição orgânica e contaminação sanitária. Valores elevados de fósforo total (até 0,12 mg/L) sugerem risco potencial de eutrofização. Embora uma leve melhora no oxigênio dissolvido tenha sido observada em agosto (4,1 mg/L), provavelmente associada ao aumento da vazão (de 59 para 93 L/s), as condições gerais permanecem severamente degradadas. Os resultados evidenciam a ausência de rede de esgoto e o lançamento contínuo de esgoto doméstico in natura, destacando a urgência de ações integradas de gestão ambiental e implantação de infraestrutura de saneamento básico.

Palavras-chave: qualidade da água; riachos urbanos; impactos antrópico

1. INTRODUÇÃO

Os riachos urbanos, em geral, apresentam alta vulnerabilidade às pressões antrópicas, especialmente em áreas densamente povoadas e com saneamento inadequado [1]. O Riacho Pau d'Arco, localizado em Maceió/AL, faz parte da bacia do Reginaldo e está localizado em uma bacia sem a coleta de esgotos e, em sua maioria, com habitações irregulares ao longo de suas margens. Essas condições resultam em descargas de esgoto doméstico e resíduos sólidos, o que vem ocasionar uma preocupante degradação da qualidade da água.

Como afluente do Riacho Reginaldo, o Pau d'Arco contribui para a carga poluidora de um sistema de drenagem urbana mais importante de Maceió, impondo riscos aos ecossistemas aquáticos e à saúde pública. Altas cargas orgânicas e a presença de patógenos são comuns, particularmente durante o período chuvoso, quando o escoamento superficial intensifica o transporte de poluentes.

Para entender o impacto da urbanização desordenada sobre os cursos d'água, é essencial analisar parâmetros físicos, químicos e microbiológicos da água. Medir índices como pH, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nutrientes, turbidez e presença de coliformes fecais ajuda a identificar de onde vem a poluição e como ela afeta o ambiente. São parâmetros concretos que permitem montar um retrato mais fiel da realidade do riacho.

Neste estudo, foram realizadas coletas em 03(três) pontos, os quais foram: Riacho Pau D'arco, e a montante e jusante da confluência com o Riacho Reginaldo. O objetivo principal da pesquisa foi caracterizar a poluição nesse trecho do Riacho e a sua correlação com as ações antrópicas. Os resultados não são apenas números: eles podem orientar políticas públicas, ajudar órgãos ambientais a priorizar intervenções e até subsidiar programas de recuperação de nascentes ou expansão de saneamento básico em regiões carentes.

Para entender o impacto da urbanização desordenada sobre os cursos d'água, é essencial analisar parâmetros físicos, químicos e microbiológicos da água. Medir índices como pH, oxigênio dissolvido(OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nutrientes, turbidez e presença de coliformes fecais ajuda a identificar de onde vem a poluição e como ela afeta o ambiente. São parâmetros concretos que permitem montar um retrato mais fiel da realidade do riacho.

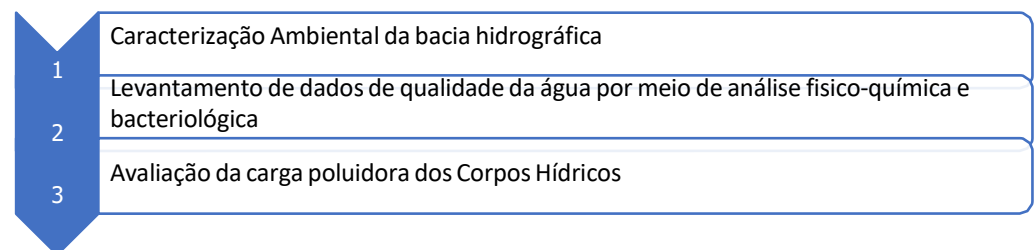
Neste estudo, foram realizadas coletas em 03(três) pontos, os quais foram: Riacho Pau D'arco, e a montante e jusante da confluência com o Riacho Reginaldo. O objetivo principal da pesquisa foi caracterizar a poluição nesse trecho do Riacho e a sua correlação com as ações antrópicas. Os resultados não são apenas números: eles podem orientar políticas públicas, ajudar órgãos ambientais a priorizar intervenções e até subsidiar programas de recuperação de nascentes ou expansão de saneamento básico em regiões carentes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A bacia do Riacho Pau d'Arco, localizada em Maceió/AL, possui área de 2,63 km² e caracteriza-se pelo uso predominantemente residencial do solo, ausência de sistema de coleta de esgoto e intensas pressões antrópicas. Em ambientes urbanos, o crescimento populacional está diretamente relacionado ao aumento do consumo de água e da geração de efluentes, ampliando a pressão sobre os corpos hídricos. Nesse contexto, compreender e garantir a qualidade da água torna-se essencial para a saúde pública e o desenvolvimento comunitário sustentável [4,5].

Para atender a esses objetivos, o estudo foi estruturado em três etapas metodológicas: (1) caracterização ambiental da sub-bacia do Riacho Pau d'Arco; (2) avaliação da qualidade da água por meio de análises físico-químicas e bacteriológicas, considerando a influência da precipitação nos dias anteriores à coleta; e (3) estimativa das cargas poluidoras ao longo do curso do riacho (Figura 1).

Figure 1. Metodologia de caracterização da bacia hidrográfica



Source: Author (2025)

As coletas foram realizadas em duas datas, distanciadas de 40 dias, mas no mesmo ponto de coleta. A primeira coleta foi realizada em 7 de julho e a segunda, em 18 de agosto de 2021, seguindo procedimentos preconizados para coleta de amostra de águas superficiais [3]. Nos mesmos dias, foram efetuadas medições de vazão para caracterizar o regime hidrológico em condições de tempo seco — ausência de precipitação significativa nas 48 horas anteriores à coleta. A vazão foi determinada pelo método volumétrico e/ou medidor de velocidade, conforme a acessibilidade e viabilidade operacional do ponto, resultando em 59 L/s em 7 de julho e 93 L/s em 18 de agosto de 2021. Esses dados de vazões são importantes para analisar uma possível variação nos parâmetros de qualidade da água, especialmente no que se refere à diluição de poluentes e ao potencial de autodepuração do curso d'água.

As análises realizadas em laboratório, na cidade de Maceió, contemplaram parâmetros físico-químicos fundamentais: temperatura, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio em 5 dias (DBO₅), pH, turbidez e fósforo total — amplamente utilizados para avaliar os impactos das atividades antrópicas em cursos d'água urbanos.

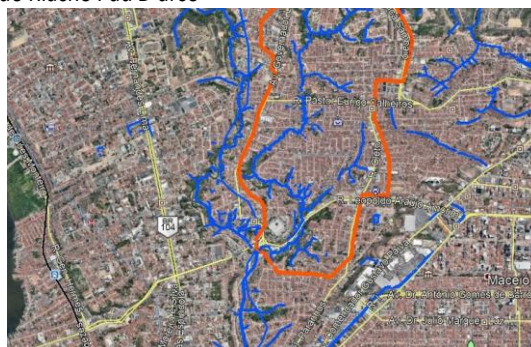
De acordo com a literatura acadêmica, os índices de OD e DBO são considerados indicadores-chave de poluição orgânica, os nutrientes (como fósforo e nitrogênio) são analisados quanto ao seu potencial de eutrofização, e os coliformes fecais funcionam como indicadores sanitários da presença de esgoto doméstico não tratado. A integração desses parâmetros, por meio de uma avaliação multicritério, possibilita a identificação de possíveis pontos de degradação ambiental, além de permitir interpretar os impactos antrópicos em

riachos tropicais urbanos, assim como, fornecer uma base consistente para diagnósticos ambientais, contribuindo para a compreensão das pressões exercidas sobre os recursos hídricos em bacias tropicais urbanizadas.

3. RESULTADOS

A bacia do Riacho Pau d'Arco está localizada no trecho intermediário da bacia do Riacho Reginaldo, apresentando nascente a 65 m de altitude e foz a 7 m, percorrendo aproximadamente 3,8 km pelos bairros do Feitosa e Jacintinho, totalizando uma área de 2,63 km². Sua ocupação é majoritariamente residencial (cerca de 70%), com 11,4% destinada a vias, das quais 3,8% são asfaltadas e 7,6% pavimentadas com paralelepípedos. A bacia não possui rede coletora de esgoto, e suas encostas são densamente ocupadas por habitações precárias.

Figure 2. Hidrografia da Bacia do Riacho Pau D'arco



Source: Author (2021)

Com o objetivo de caracterizar a influência do Riacho Pau d'Arco no Riacho Reginaldo, as análises foram realizadas em pontos a montante, no ponto de confluência e a jusante deste. A Tabela 1 apresenta os principais indicadores de qualidade da água obtidos em duas campanhas de monitoramento (julho e agosto de 2021).

Tabela 01. Parâmetros de qualidade da água do Riacho Pau d'Arco (julho e agosto de 2021)

Parâmetros	COLETA / RESULTADOS						Limite CONAMA
	07/07/2021			18/08/2021			
	66007	66008	66009	66709	667010	667011	
DBO (mg/L)	21	15	16	19	18	18	Máx 5,0 mg/L
DQO (mg/L)	88	80	80	4,25	4,10	4,05	Sem especificação
Coliforme Fecal (UFC/100mL)	>160.000	>160.000	>160.000	42000	68000	24000	Máx 1.000 UFC/100 mL
Fósforo – P (mg/L)	0,11	0,08	0,12				Máx. 0,030 ou 0,050 mg/L
Nitrato – N (mg/L)	2,66	0,61	2,45				Máx. 10,0 mg/L
Sólidos Sedimentares (mL/L)	0,1	0,1	0,1				Sem especificação
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,7	1,2	1,7				Mín 5,0 mg/L
pH	6,96	7,02	7,00				6 a 9
Temperatura	25,0	25,0	25,0				-
Salinidade (% o)	0,14	0,14	0,15				Igual ou inferior a 0,5‰
Turbidez (NTU)	34,4	28,1	33,9				Até 100 NTU
Cloreto Total (mg/L)	63,6	62,6	66,6				Máx. 250 mg/L
Nitrito (mg/L)	0,21	0,16	0,49				Máx. 1,0 mg/L
Ferro Dissolvido (mg/L)	0,49	0,7	0,38				Máx. 0,3mg/L
Condutividade (µ S/cm)	437,15	436,5	495,26				Sem especificação
Cor aparente (mg Pt – Co/L)	30	5	30				****
Clorofila a (µg/L)	0,67	1,19	0,67				30µg/L

Percebe-se que existem variações nos parâmetros de qualidade da água entre as duas campanhas. Em julho, o oxigênio dissolvido (OD) apresentou-se criticamente baixo (1,2 mg/L), muito inferior ao limite mínimo estabelecido para águas doces de Classe 2 ($\geq 5,0$ mg/L) pela legislação brasileira [6]. Em agosto, o OD aumentou para 4,1 mg/L, indicando uma melhora temporal, embora ainda insuficiente. A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) permaneceu elevada em ambas as campanhas (16–18 mg/L), superando amplamente o limite de 5 mg/L, o que evidencia elevada carga orgânica, possivelmente associada ao lançamento de esgoto doméstico in natura. A demanda química de oxigênio (DQO), medida em julho, alcançou 80 mg/L, corroborando a presença de matéria orgânica em excesso (Figura 3).

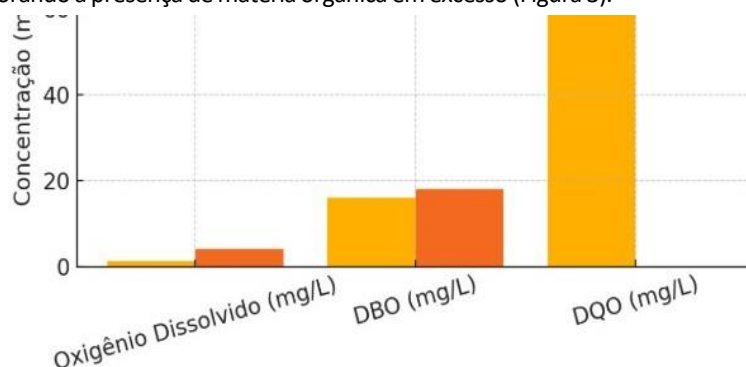


Figure 3. Comparação entre Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) nas campanhas de julho e agosto de 2021

Quanto ao fósforo total, em julho, o mesmo atingiu 0,08 mg/L, superando o limite de 0,05 mg/L, enquanto o nitrato alcançou 0,61 mg/L, reforçando o risco de eutrofização. Esses resultados são coerentes com observações em outras bacias urbanas brasileiras, onde o enriquecimento por nutrientes está diretamente associado ao despejo de esgoto doméstico [7].

Quanto aos parâmetros microbiológicos, em julho, os valores de coliformes fecais ultrapassaram 160.000 UFC/100 mL, e em agosto permaneceram extremamente elevados (68.000 UFC/100 mL), superando em várias ordens de grandeza o limite legal de 1.000 UFC/100 mL (Figura 2).

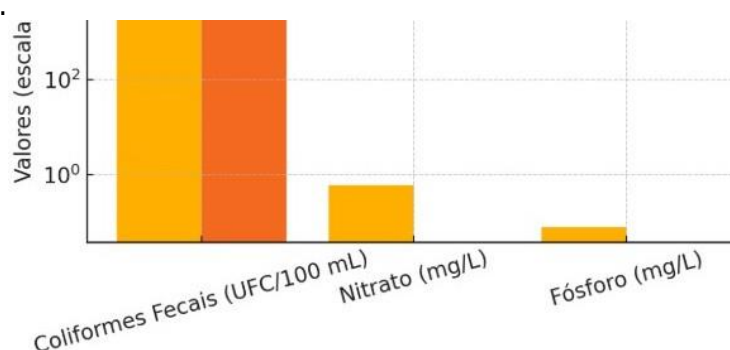


Figure 4. Comparação entre Coliformes Fecais, Nitrato e Fósforo, em escala logarítmica para melhor visualização dos coliformes.

Verificou-se que parâmetros físicos, como turbidez e pH, mostraram menor variação. Em julho, a turbidez foi de 28,1 NTU, bem abaixo do limite de 100 NTU, e o pH manteve-se dentro da faixa aceitável (7,02). Condutividade e cor aparente sugeriram a presença de matéria orgânica dissolvida típica de ambientes impactados.

Apesar de uma pequena melhora na oxigenação em agosto, as condições gerais permaneceram severamente degradadas, em conformidade com estudos que evidenciam a vulnerabilidade de pequenas bacias urbanas tropicais às pressões antrópicas [9]. Essa variação pode estar relacionada ao regime hidrológico: medições em tempo seco mostraram aumento da vazão, de 59 L/s em julho para 93 L/s em agosto, o que pode ter contribuído para a diluição dos poluentes e o aumento do oxigênio dissolvido. Essa dinâmica ressalta a relevância da integração de dados de qualidade da água com informações hidrológicas em diagnósticos ambientais de riachos urbanos tropicais.

4. DISCUSSÃO

Os dados não deixam dúvidas que o Riacho Pau d'Arco está sufocando. Assim como acontece em tantos outros rios urbanos pelo Brasil, a ação humana está asfixiando esse curso d'água. Quando são analisados os dados de oxigênio dissolvido, os números são alarmantes pois é difícil até que se tenha vida aquática. E não é difícil entender por quê: toneladas de esgoto sem tratamento são despejadas diariamente, um problema crônico que se reflete também nos índices absurdos de DBO [10].

O fósforo, outro vilão dessa história, aparece em quantidades que explicam as manchas esverdeadas na superfície. Os dados indicam que o riacho está com sinais clássicos da eutrofização [11]. Mas o que mais choca são os coliformes fecais. Os valores chegam a ser dez, às vezes vinte vezes acima do limite legal – um risco sanitário para qualquer comunidade [12].

Verifica-se que até com o aumento da vazão, e consequentemente, aumento da oxigenação, o corpo hídrico continua em degradação. Mas apenas atenuou a situação, mas não resolveu.

Analisando os números com atenção, percebe-se que riachos urbanos como o Pau d'Arco funcionam como "termômetros" da pressão urbana. Quando são cruzados os parâmetros – aqueles índices de oxigênio que mal chegavam a 2 mg/L em alguns pontos com as amostras repletas de coliformes –, fica claro que estamos diante de um padrão que se repete: cursos d'água menores são os primeiros a entrar em colapso.

Aqui, duas questões se impõem: a falta crônica de saneamento (nas amostras coletadas próximo às ocupações irregulares, os valores eram os mais críticos) e o assoreamento progressivo. Curiosamente, durante o período de chuvas em agosto, observa-se uma pequena melhora nos níveis de OD, mas todo pesquisador experiente sabe reconhecer quando um aumento pontual mascara um problema estrutural – foi exatamente o que registramos.

5. CONCLUSIONS

Os resultados obtidos evidenciam que a qualidade da água do Riacho Pau d'Arco encontra-se severamente comprometida, com parâmetros físico-químicos e microbiológicos consistentemente abaixo dos padrões aceitáveis. A combinação de baixos teores de oxigênio dissolvido, elevadas cargas orgânicas e concentrações alarmantes de coliformes termotolerantes configura um quadro típico de corpos hídricos submetidos a intensa pressão urbana. Essa situação reflete diretamente a ausência de infraestrutura sanitária adequada e o lançamento contínuo de efluentes domésticos não tratados.

O enriquecimento por fósforo, particularmente preocupante, indica um processo acelerado de eutrofização, que pode levar a alterações irreversíveis no ecossistema aquático. Apesar da discreta melhora na oxigenação observada durante o período de maior vazão (agosto), essa variação mostrou-se temporal e relacionada principalmente a efeitos de diluição, não representando uma redução efetiva na carga poluidora. Esse padrão reforça a importância de considerar as variações hidrológicas no monitoramento da qualidade da água.

Embora tenha sido observada uma discreta melhora na oxigenação em agosto, tal variação esteve provavelmente associada ao aumento da vazão e ao efeito de diluição, e não a uma redução real nas cargas poluidoras. Essa dinâmica evidencia a importância de integrar o monitoramento hidrológico às análises de qualidade da água.

REFERENCES

1. Walsh, C.J., et al. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), 706–723.
2. Tundisi, J.G., & Matsumura-Tundisi, T. (2008). Limnology in Brazil: problems, potentialities and perspectives. *Brazilian Journal of Biology*, 68(4), 927–935;
3. ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras de Água. Brasília: ANA, 2019. DOI: 10.5281/zenodo.4317363
4. Von Sperling, M. (2014). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4ª ed. Belo Horizonte: UFMG. (Livro acadêmico amplamente citado, sem DOI disponível)
5. Esteves, F.A. (2011). Fundamentos de Limnologia. 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência. (Livro referência em limnologia no Brasil, sem DOI disponível)
6. 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 o seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, 2005.

7. Silva, D.F., & Cunha, D.G.F. (2018). Nutrient enrichment and eutrophication in urban streams of Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 23, e29. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170107>
- 8.
9. Piveli, R.P., & Kato, M.T. (2006). *Qualidade das Águas e Poluição: aspectos físico-químicos*. São Paulo: ABES.
10. Porto, M.F.A., & Porto, R.L.L. (2008). Gestão de bacias hidrográficas urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 13(1), 5–14. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v13n1.p5-14>
11. Tucci, C.E.M. (2008). Águas urbanas no Brasil. *Estudos Avançados*, 22(63), 97–112. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200007>
12. Von Sperling, M., & Gonçalves, R.F. (2017). *Wastewater Management in Brazil: Lessons and Perspectives*. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56789-5>

Comparison of non-structural concretes with replacement of plastic polishes and traditional aggregates

Clarissa Nascimento Soares ^{1,2*}, Victoria Kamilé de Castro Almeida ^{1,2}, Maria Fernanda Torres dos Santos ^{2,3}, Marcos Santana dos Santos ^{2,4}, Marcelo Reis ^{1,2} and Jessé Marques Pavão ^{1,2}

¹ Post-graduate Program in Analysis of Environmental Systems, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brazil.

² Emergency and Ecosystem Resilience Laboratory - LERE, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brazil.

³ Bachelor's Degree in Design, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brazil.

⁴ Bachelor's Degree in Civil Engineering, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brazil.

* Correspondence: clarissansoares@gmail.com

Abstract: The increasing generation of plastic waste, due to its low biodegradability and improper disposal, poses a serious environmental challenge. Recycling these materials is emerging as a strategic solution, particularly in civil construction, for the production of more environmentally friendly concrete. This study compares a conventional mix (TC) with two experimental concrete mixes (TE01 and TE02) to assess the feasibility of producing concrete with partial replacement of natural aggregates with plastic polymer waste. The methodology consisted of concrete batching with partial replacement of concrete aggregates with polymer waste, specifically fine aggregate, in a proportion of 5% polyethylene terephthalate (PET) and another 5% each of polypropylene and polystyrene (PP+PS), and coarse aggregate with expanded polystyrene (EPS), also in a proportion of 5% for TE01. TE02 used fine aggregate, in a proportion of 10% polyethylene terephthalate (PET) and coarse aggregate with expanded polystyrene (EPS). Strength, compression, tensile strength, and water absorption tests were conducted and compared with those of conventional concrete. Based on the results, it was determined that TE01 demonstrated mechanical efficiency for non-structural use, and TE02 for use in small structures. Samples TE01 and TE02 help reduce environmental impacts and greenhouse gases, promoting the reuse of plastic waste in concrete and reducing landfill disposal.

Keywords: irregular disposal; recycling; reduction of carbon emissions; polymer; sustainable concrete

1. INTRODUCTION

Unplanned urban expansion, combined with low environmental awareness among the population, deficient infrastructure, and the absence of effective public policies for solid waste management, has contributed significantly to the inadequate accumulation of urban solid waste (MSW). Among these wastes, polymeric plastics, such as polyethylene terephthalate (PET), polypropylene (PP), polystyrene (PS), and expanded polystyrene (EPS), stand out, whose presence is recurrent and problematic in urban centers [1,2]. The exponential increase in plastic waste generation poses a highly complex environmental challenge due to its low biodegradability and the adverse impacts resulting from improper disposal. Recycling plastic polymers has established itself as a strategic approach to mitigate this problem, with relevant applications in the construction sector [3]. Improper management of this waste has intensified its presence in natural ecosystems, particularly marine environments, where approximately 6.1 million tons of plastic accumulate annually, compromising aquatic biodiversity [4]. Furthermore, the degradation of these materials results in the formation of microplastics, which have been associated with significant toxic effects, including endocrine disruption and carcinogenic potential [5].

On the other hand, according to the World Wide Fund for Nature (WWF) report, "Solving Plastic Pollution: Transparency and Accountability," it reinforces that the global plastic pollution crisis will only worsen unless all actors in the plastics value chain take responsibility for the true cost of the material to nature and people. They further state that the life cycle of plastic polymers is compromised by the low capacity of industries to carry out large-scale recycling. This is due, in part, to the unprofitability of this practice and the scarcity of ecologically validated alternatives. Currently, only about 20%

of plastic waste is effectively recycled [2,6,7]. The construction industry consumes a huge amount of materials annually, requiring the constant extraction of natural resources, generating significant environmental impacts. Concrete manufacturing, in particular, demands large volumes of inputs such as cement, aggregates, and water [8]. Therefore, sustainable practices have been gaining ground in the sector, particularly initiatives aimed at producing more environmentally friendly concrete. Scientific research has explored the incorporation of various types of waste, previously considered incompatible with this material, as a way to mitigate environmental damage [8,9]. Aggregates represent approximately 80% to 85% of a typical concrete mix and are responsible for an unsustainable consumption of local natural resources [10]. It is also worth noting that sand and gravel, the main resources extracted for aggregate production and sold in bulk, can cause erosion in river deltas and coastal areas. Therefore, the use of substitutes and alternative materials is an appropriate means of preventing or reducing damage to river and marine ecosystems [9]. However, concretes that use recycled aggregates often have different properties than conventional ones, since the type of waste used directly influences the final characteristics of the product. This makes in-depth study of these alternative materials essential [11].

This study proposes to compare a conventional mix with two experimental concrete mixes and to evaluate the feasibility of concrete production with partial replacement of natural aggregates by plastic polymer waste.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Analysis of the technical specifications and test methods required by current technical standards

The general specifications related to recycled aggregate, covering parameters such as particle size distribution, maximum characteristic dimension and other relevant physical properties, were defined based on the guidelines established by the Brazilian technical standards NBR 15116:2004 [12], which deals with the requirements for the use of recycled aggregates from construction waste, and NBR NM 248:2003 [13], which standardizes the procedures for particle size analysis of aggregates. Material characterization and experimental testing were conducted in a controlled environment, following strict methodological protocols to ensure the reliability of the data obtained. This process was made possible through a strategic institutional collaboration with Tecnosenge Tecnologia e Serviços de Engenharia and the startup Policoncret. The partnership between these institutions enabled the integration of technical knowledge, laboratory infrastructure, and materials engineering expertise, contributing significantly to the validation of results and the advancement of research into the application of recycled aggregates in sustainable construction systems.

2.2. Concrete dosage

This work is based on studies initiated by Feitosa Júnior [14] and Pacheco et al. [2], in which the proportions of materials used in concrete were defined and investigated different dosages with partial replacement of aggregates by polymeric residues. The selected dosage was the one that presented the best results in terms of tensile and compressive strength. The conventional mix (TC), without the application of polymers, consists of cement, sand, gravel, and water. The modified concrete, referred to in this research as experimental concrete 01 (TE01), incorporates volumetric replacements of aggregates: 5% of fine aggregate (washed medium sand) by polyethylene terephthalate (PET), 5% by a mixture of polypropylene and polystyrene (PP+PS), and 5% of coarse aggregate ($\frac{3}{4}$ gravel) by expanded polystyrene (EPS). Furthermore, this study produced Experimental Mixture 02 (TE02), which included only recycled PET polymers and changed the grain size of the sand and gravel to direct this concrete toward better-finished concrete products. TE02 incorporates volumetric replacements of aggregates: 10% of the fine aggregate (washed fine sand) with polyethylene terephthalate (PET) and 5% of the coarse aggregate (gravel 0) with expanded polystyrene (EPS). The aim is to study the three mixtures and conduct an in-depth study, seeking to understand their characteristics, similarities, and differences in a comparative approach. The corresponding masses of these proportions are detailed in Table 1.

Table 1. Details of mass dosages.

Water	Mass input					Cement	Concrete
	Coarse Aggregate	Small aggregate					
(kg)	EPS (kg)	Crushed stone (kg)	PP+PS (kg)	PET (kg)	Sand (kg)	(kg)	
6.710	-	30.000	-	-	28.290	13.500	Conventional (TC)
6.710	0.013	² 28.500	0.383	0.584	¹ 25.460	13.500	Experimental 01 (TE01)
6.710	0.013	⁴ 28.500	-	1.168	³ 25.460	13.500	Experimental 02 (TE02)

¹ Medium washed sand² Crushed stone 3/4³ Fine washed sand⁴ Crushed stone 0

2.3. Collection of polymeric packaging waste and waste processing

The plastic polymers were obtained by collecting waste that accumulates irregularly on streets and along the banks of lakes and rivers, carried out by collectors linked to the Policoncret Startup. Subsequently, the polymeric materials were sanitized and processed in a grinding mill (JTT-300 - Standard Injetec Granulator Mill with a grinding capacity of 200-250 kg), as part of the Plastic Oceans Project: Monitoring the Plastic Production Chain at Cesmac University Center (Figure 1). This process took place at the Cesmac Center of Exact and Technological Sciences, in the laboratory where Policoncret is located. Figures 2 and 3 shows the PET and EPS after grinding.

**Figure 1.** Crusher mill**Figure 2.** Shredded PET**Figure 3.** Crushed EPS

2.4. Production of test specimens

The production of test specimens based on three mixes was carried out in the proportion of 12 test specimens for each mix, totaling 36 test specimens, 12 with conventional concrete dosage and 12 experimental 01 and 12 experimental 02. The tests complied with the requirements of NBR 5738/2015 [15] and NBR 16886/2020 [16].

2.5. Analysis of axial compressive strength and tensile strength

To evaluate the axial compressive strength, three TC, three TE01, and three TE02 specimens were used, molded according to the criteria established by NBR 7215:2019 [17]. The rupture tests were performed in a Contenco brand digital electrohydraulic press, model I-3025-A. In addition, the diametrical compression tensile strength was determined in accordance with NBR 7222:2021 [18]. The dimensions of the specimens, including height and diameter, were determined with the aid of a digital caliper. Then, the specimens were positioned in an auxiliary device to ensure correct alignment in the Solotest brand electrohydraulic press, where they were subjected to the compression test until rupture.

2.6. Analysis of water absorption, void ratio and specific mass

The evaluation of water absorption by immersion was carried out using conventional and experimental concrete samples 01 and 02, according to the procedures described in the NBR 9778/2009 standard [19]. For each type of concrete, three test specimens were used, which were initially subjected to oven drying at a temperature of $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ for 72 hours. After this period, the samples were weighed to obtain their dry masses. Then, the test specimens were fully submerged in water at room temperature, remaining in this condition for another 72 hours. The values of water absorption, void index and specific masses in the dry, saturated and real conditions were obtained using Equations 1 to 5, as established in the NBR 9778/2009 standard.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

$$lv = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (2)$$

$$P_s = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (3)$$

$$P_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (4)$$

$$P_r = \frac{m_s}{m_s - m_i}$$

Where:

A = Percent absorption

m_{sat} = mass of the sample saturated in water after immersion and boiling

m_s = mass of the oven-dried sample

lv = void ratio

m_i = mass of the saturated sample immersed in water after boiling

p_s = specific mass of the dry sample

p_{sat} = specific mass of the saturated sample after boiling

p_r = actual specific mass

2.7. Comparison between concrete mixes with partial replacement of aggregates by plastic polymers

By analyzing the information from the three mixes, a comparative study was carried out to evaluate the feasibility of producing concrete with partial replacement of natural aggregates by plastic polymer waste.

3. RESULTS

3.1. Tensile and compressive strength analysis

Table 2 presents the results obtained in the compression and tensile tests carried out on the analyzed concretes.

Table 2. Results of tensile and compression strength tests.

Concrete	Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
TC	99.88	194.26	2.98	19.07
TE01	100.23	194.60	2.53	19.73
TE02	100.50	195.70	2.33	21.70

It can be observed that the average compressive strength value of the experimental mix TE01 showed a slight variation in relation to conventional concrete (TC), being approximately 3.46% higher. Mix TE02, on the other hand, showed a more significant difference, with a strength approximately 13.79% higher than TC. When directly comparing the experimental mixes TE01 and TE02 with each other, an improvement of approximately 10% in compressive strength is observed, with TE02 presenting the highest value among the mixes analyzed. Regarding tensile strength, the TE01 mix presented an average value approximately 15.10% lower than that of conventional concrete (TC). The TE02 mix, in turn, presented an even greater reduction, with a strength approximately 21.81% lower than TC. Comparing TE01 and TE02 in tensile strength, a decrease of approximately 7.90% is observed, with TE02 having the lowest performance in this regard among the experimental mixes.

3.2. Analysis of water absorption, void ratio and specific mass

The results of the water absorption tests by immersion, void index and specific mass, started on the 28th day of curing and completed seven days later, after the boiling process and the

respective weighing of the test specimens are presented in Table 3 below.

Table 3. Water absorption and void index.

Concrete	Mass (g)			Specific mass (kg/dm³)			Sample volume (cm)	Absorption (%)	Void index (%)
	Dry	Immersion	Saturated	Dry	Saturated	Real			
TC	3313	2009	3567	2.127	2.869	2.500	1558	7.66	16.27
TE01	3307	2023	3579	2.126	2.300	2.578	1556	8.23	17.51
TE02	3218	1653	3461	1.788	1.923	2.070	1782	6.78	13.50

The properties of water absorption, void ratio, and specific gravity indicate standards of concrete quality and durability. In this comparative study, the average values of water absorption, void ratio, and dry, saturated, and actual specific gravity showed no significant differences between TC and TE01. However, TE02 showed significant differences compared to TC and TE01.

4. DISCUSSION

In the studies by Rodrigues et al. [20], it was demonstrated that the incorporation of crushed polymers into concrete becomes advantageous in relation to compressive strength, in which the effects of incorporating different percentages of PET fibers into concrete were analyzed, in the proportion of 4.5%, 5% and 5.5%, the addition of these fibers caused a reduction in compressive strength of approximately 18% compared to conventional concrete. However, on the other hand, the samples with the addition of PET fibers obtained tensile strength approximately 26% higher when compared to conventional concrete, making this concrete more promising in relation to stresses caused by traction.

According to NBR 8953/2015 [21], the average compressive strength values to be classified as structural require values equal to or greater than 20 MPa. The average compressive strength values of the studied concretes TC and TE01 did not reach this classification, therefore they are considered non-structural. Even so, for Pacheco et al. [2], it is observed that the TE01 concrete, in relation to strength criteria, has mechanical properties that can be advantageous for use in elements primarily subjected to compression, such as columns. On the other hand, TE02 meets this standard with an average compressive strength value of 21,70 MPa, indicating that the concrete supports compressive loads adequately for small structures.

Regarding tensile strength results, TE01 and TE02 have lower results than TC, which can be compensated for by increasing the steel ratio in reinforced concrete elements subjected to significant tension. Jerônimo et al. [22] state that stresses of this nature in reinforced concrete are mostly neutralized by steel bars. TC and TE01 have tensile and compressive strength values that, based on the tests performed, are satisfactory for use in non-structural concrete. On the other hand, TE02 requires further studies with other tests to become satisfactory for use in concrete for structural purposes in small structures. Thermal analysis tests will be conducted in the future.

A study by Piasta and Zarzycki [23] states that the lower the water absorption properties, void ratio, and specific gravity, the greater the durability and quality of the concrete. Water absorption refers to the concrete's ability to absorb water into its pores. When concrete's water absorption decreases, it becomes denser and more impermeable, which is desirable for the structure's durability. This reduction in absorption can be caused by several factors, including a good water-to-cement ratio. TE02 had the lowest water absorption percentage, thus being the most durable.

The void ratio represents the proportion of volume occupied by voids in relation to the total volume of the concrete. A reduction in the void ratio means there are fewer voids between the aggregates and the cement paste, resulting in a more compact and resistant structure, as is the case with TE02 compared to TC and TE01. Specific gravity is the ratio between the mass and volume of the concrete. Lower values for both properties generally indicate denser and stronger concrete, with a lower probability of deterioration, confirmed in relation to TE02 under TC and TE01.

5. CONCLUSIONS

Compressive and tensile strength analysis demonstrated that TE01 and TE02 achieved strength values close to those of TC, higher in compression and lower in tension, presenting generally satisfactory results. TE02 exceeded values for small structural concrete. TC and TE01 are considered non-structural. The TE01 samples did not show significant variations in water absorption, specific mass, or void ratio, indicating, according to these parameters, that this material can be applied similarly to conventional concrete. On the other hand, the TE02 samples showed significant variations, confirming an improvement in quality and durability.

The use of concrete based on plastic polymers contributes to the reuse of urban solid

waste, reducing the disposal of plastics in landfills, promotes environmentally responsible development, giving waste a diverse, energy-efficient destination, through the reduction of carbon emissions into the atmosphere.

REFERENCES

1. Srivastava, V.; Ismail, S. A.; Singh, P.; & Singh, R. P. Urban solid waste management in the developing world with emphasis on India: challenges and opportunities. *Rev Environ Sci Biotechnol* **2015**, 14(2), 317-337. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9352-4>
2. Pacheco, R. L.; Soares, C. N.; de Santana, R. S. P.; dos Santos, A. F.; de Santana, M. S. A.; & Pavao, J. M. D. S. J. Polymer aggregate as a sustainable alternative for concrete production. *Revista de Gestão Social e Ambiental* **2025**, 19(3), pp.1-22.
3. Bezerra, A. C. L.; Alencar, D. B. de; Campos, P. S.; Moraes, N. M.; Bezerra, E. S. L. dos R.; & Bezerra, C. G. dos R. Análise das propriedades mecânicas do concreto com adição de seixo e polietileno tereftalato (PET). *Revista de Gestão e Secretariado* **2025**, 16(2), e4530. <https://doi.org/10.7769/gesec.v16i2.4530>
4. The Pew Charitable Trusts; Systemiq. *Breaking the Plastic Wave: A Comprehensive Assessment of Pathways Towards Stopping Ocean Plastic Pollution*; The Pew Charitable Trusts: Philadelphia, PA, USA; Systemiq: London, UK, 2020.
5. Wright, J. J.; Saunders, D. C.; Dai, C.; Poffenberger, G.; Cairns, B.; Serreze, D. V.; ... & Powers, A. C. Decreased pancreatic acinar cell number in type 1 diabetes. *Diabetologia* **2020**, 63(7), pp. 1418-1423. <https://doi.org/10.1007/s00125-020-05155-y>
6. Yaroslavov, A. A.; Arzhakov, M. S.; & Khokhlov, A. R. The life cycle of polymer materials: Problems and prospects. *Her. Russ. Acad. Sci.* **2022**, 92(1), pp. 18-24. <https://doi.org/10.1134/S1019331622010087>
7. WWF - World Wide Fund for Nature. Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico. 2019. Available online: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico> (accessed on August 12, 2025)
8. Collivignarelli, M. C.; Cillari, G.; Ricciardi, P.; Miino, M. C.; Torretta, V.; Rada, E. C.; & Abbà, A. The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: A review. *Sustainability* **2020**, 12(19), 7903. <https://doi.org/10.3390/su12197903>
9. UN. Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources; UN: New York, NY, USA, 2019.
10. Schneider, M.; Romer, M.; Tschudin, M.; Bolio, H. Sustainable cement production - Present and future. *Cem. Concr. Res.* **2011**, 41, 642-650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>
11. Pimentel, L. L.; Rizzo, G. F.; Jacintho, A. E. P. G. D. A.; & Fontanini, P. S. P. Concrete produced with recycled aggregate: a durability analysis for structural use. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* **2020**, 13, e13613. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000600013>
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116 (2004). *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 (2003). *Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT.
14. Feitosa Júnior, E. A. Análise da incorporação de materiais poliméricos em concretos: uma alternativa para a diminuição do aporte de plásticos no ambiente. Dissertação (Mestrado em Análise de Sistemas Ambientais), Centro Universitário Cesmac, Maceió, 2019.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 (2015). *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: ABNT.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16886 (2020). *Concreto - Amostragem de concreto fresco*. Rio de Janeiro: ABNT.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 (2019). *Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 (2021). *Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 (2019). *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT.
20. Rodrigues, N. C. S.; Carvalho, M. M. B.; Balbino, A. V. M.; Vasconcelos, A. L. R. Fibra de PET na produção de concretos. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração* **2018**, 15(3), 207-211. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1580>
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953 (2015). *Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro: ABNT.
22. Jerônimo, V. A.; Piccinini, A. C.; Silva, B. V.; GODINHO, D.; Bernardin, A. M., & Vargas, A. Influence of concrete admixture on the bond strength of reinforced concrete submitted to high temperature. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* **2020**, 13, 212-221. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000200003>
23. Piasta, W., & Zarzycki, B. The effect of cement paste volume and w/c ratio on shrinkage strain, water absorption and compressive strength of high-performance concrete. *Construction and Building Materials* **2017**, 140, 395-402. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.033>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Contaminação microplástica em praias urbanas de Maceió, Alagoas.

ÉLICA GUEDES^{1*}, MANOEL COSTA², IAN SANTOS³, FILLIPE MORAIS³, ROBERTA LOBO³, AMANDA LIMA³,

¹Laboratório de Ficologia/LABOFIC, Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde/ICBS, Universidade Federal de Alagoas/UFAL.

²Pesquisador *pos-doc*, Laboratório de Aquicultura e Ecologia Aquática/LAQUA, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias/CECA, Universidade Federal de Alagoas/UFAL.

³Alunos de graduação e estagiários do Laboratório de Ficologia/LABOFIC, Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde/ICBS, Universidade Federal de Alagoas/UFAL.

*elica.guedes@icbs.ufal.br

Abstract: The use of plastic has become increasingly common with the advancement of humanity, and its accumulation as waste has also progressively increased, especially in aquatic environments. Studies indicate that there may be more microplastic fragments among algae in aquatic bodies than microorganisms in the food base. This study aimed to highlight microplastic contamination along the beaches of the central coast of Maceió, Alagoas. To analyze the presence of microplastics, 14 water samples were collected and 1 mL aliquots were examined. Microplastic particle (MP) counts and categorizations were performed using a binocular optical microscope (Zeiss) with a Sedgwick-Rafter camera. The results of the analyses were calculated in terms of relative abundance (%) and frequency of occurrence (%). Microplastics were classified by the colors blue, yellow, gray, orange, brown, green, red, pink, and transparent. It was observed that transparent microplastics (100%) were the most abundant and frequent in the samples analyzed, followed by green microplastics (15.9%). The greater presence of transparent material may occur because it is the dominant material in plastic manufacturing, and as time passes, it loses its color. Thus, it is possible to suggest that they are ancient materials, since plastic takes around 400 years to fully decompose and, therefore, they are more abundant and accumulate increasingly in aquatic environments, harming and competing for space with the life present there.

Keywords: Plastics, Marine life, Pollution, Ecological importance.

1. INTRODUÇÃO

Os rios, oceanos e mares são ecossistemas particularmente sensíveis às atividades humanas. No Brasil, as bacias hidrográficas e oceanos vêm sofrendo impactos significativos devido à exploração intensiva dos recursos naturais e principalmente o descarte inadequado de efluentes nas áreas urbanas. Diversos estudos documentaram a deterioração da qualidade da água em decorrência das ações antrópicas [1].

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente listou o plástico poluição como uma ameaça crítica comparável às alterações climáticas [2] e a contaminação de ambientes aquáticos pelos plásticos têm se intensificado nos últimos anos [3]. A falta de uma gestão adequada dos resíduos leva ao elevado níveis de partículas plásticas em sedimentos [4]. Itens de plástico primário, como garrafas e os sacos são um problema menor do que as partículas microplásticas (MPs) resultante da degradação do plástico no meio ambiente [5]. Fragmentação plástica em pedaços menores é causada pela radiação solar, físicos mecanismos, oxidação e ação atmosférica [6].

O termo microplásticos é usado para definir partículas de plástico menores que 5 mm de diâmetro e que variam em tamanho, forma, cor e composição química [7]. A presença deles em corpos d'água é uma séria preocupação, porque sua ingestão ou absorção por organismos aquáticos pode causar emaranhamento e bloqueio do trato digestivo, bem como efeitos toxicológicos de produtos químicos liberados [8, 9] Pannetier et al. (2020).

A contaminação por partículas de MPs pode derivar de muitas fontes e atingir altas densidades amplamente distribuídas podendo atingir praias, coluna de água do mar, sedimentos, solo, atmosfera, água doce de rios, lagos e até sistemas aquaculturais. Um aspecto importante a considerar é que, embora o Brasil seja um país subdesenvolvido, os padrões de consumo de plástico em algumas regiões muito urbanizadas da região Nordeste são semelhantes aos observados em países em desenvolvimento e desenvolvidos [10]. No ano de 2018, o Brasil fabricou

8,3 milhões de toneladas de materiais plásticos, o que representa 57% da quantidade produzida na América do Sul, e do plástico dos resíduos gerados, o Brasil recicla apenas cerca de 1,3%, mostrando o potencial de contaminação ambiental por esses resíduos [11].

Vários estudos na literatura mostram a presença de contaminação por partículas de MPs nos oceanos. Diante desses aspectos, o principal objetivo deste estudo foi evidenciar a contaminação microplástica em praias urbanas de Maceió, Alagoas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Coleta de material

Para a obtenção dos microplásticos foram feitos arrastos horizontais e superficiais (50cm de profundidade) com rede de plâncton (dimensões: 30 cm de diâmetro x 70 cm de comprimento e abertura de malha de 20 μ m) em embarcação com velocidade de 1 nó (cerca de 2km/h) durante cinco minutos (Fig. 1). As coletas foram realizadas no trecho entre o Emissário submarino de Maceió até o Terminal Marítimo de Uso Privado da Braskem (TUP), nos meses de junho/2024 e maio/2025, totalizando 14 amostras (Fig. 2).

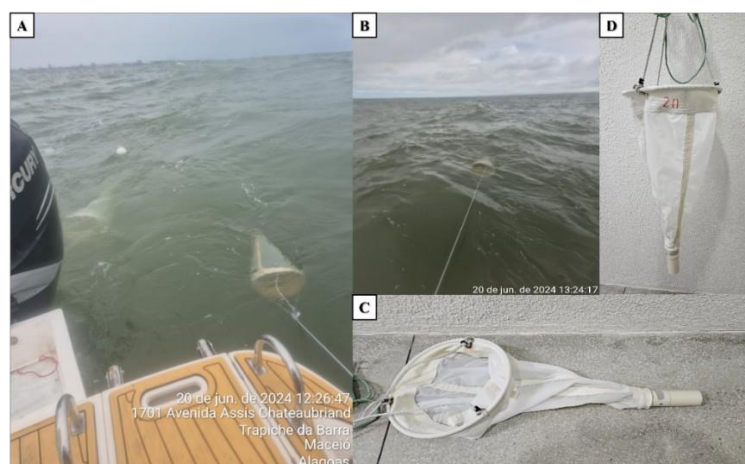


Figura 1. Coletas de microplástico no trecho do emissário submarino até o Terminal Marítimo de Uso Privado da Braskem (TUP), Maceió/AL. (A-B) arrastos horizontais e subsuperficiais; (C-D) rede de fitoplâncton com abertura de malha de 20 μ m.



Figura 2. Mapa de localização dos sete pontos no trecho do emissário submarino até o Terminal Marítimo de Uso Privado da Braskem (TUP), Maceió/AL. () Pontos de coleta.

2.2. Análise das amostras

A análise da composição do microplástico foi determinada por meio de montagem de lâminas temporárias das amostras coletadas, sendo visualizadas em microscópio binocular Zeiss (Axioscop 40) com ampliação de 4x até 40x. Para o estudo quantitativo, foram analisadas duplicatas de cada amostra, utilizando alíquotas de aproximadamente 1mL, de acordo com o método de Sedgewick-Rafter (S-R) [12].

2.3. Categorização de partículas microplásticas (MPs)

Nas 14 amostras de água, as partículas de MPs foram categorizadas morfológicamente em fragmentos e fibras filamentosas, nas cores azul, amarelo, cinza, laranja, marrom, verde, vermelho, rosa e transparente, conforme metodologia descrita [11].

2.3. Análise quantitativa

A frequência de ocorrência (%) foi determinada com base no número de vezes que cada microplástico foi identificado, utilizando a fórmula: $F = P \times 100 / p$, onde “P” representa o número de amostras contendo o microplástico, e “p” representa o número total de amostras. Foram estabelecidas as seguintes categorias: muito frequente (MF) – quando ocorre em mais de 70% das amostras; frequente (F) – ocorrendo entre 70% e 40% das amostras; pouco frequente (PF) – com ocorrência entre <40% e 20% das amostras; e esporádica (E) – ocorrência inferior a 20% [13].

Após a contagem dos microplásticos foram calculadas a abundância relativa, utilizando a fórmula: $A = N \times 100 / n$ onde, “N” = n° de espécies na amostra; “n” = n° total de espécies, sendo estabelecidos os seguintes critérios: dominante – ocorrência maior do que 50%; abundante – ocorrência entre 50 e 30%; pouco abundante – ocorrência entre 30 e 10%; rara – menor de 10% [14].

3. RESULTADOS

Houve maior abundância de microplásticos na água, na tonalidade transparente, em todas as amostras analisadas, seguidas dos microplásticos de cores rosa (19,8%) no ponto 2 e verdes (15,9%) no ponto 1, ambos na coleta de maio/2025 (Tabela 1). No geral, as partículas de MPs mais frequentes foram fibras transparentes em todas as amostras analisadas, que representam, por exemplo, as fragmentações de sacolas plásticas (Fig. 3).

Tabela 1. Abundância relativa (%) do microplástico nas 14 amostras analisadas no trecho do emissário submarino até o Terminal Marítimo de Uso Privado da Braskem (TUP), Maceió/AL, nos meses de junho/2024 e maio/2025. (P1) Ponto 1; (P2) Ponto 2; (P3) Ponto 3; (P4) Ponto 4; (P5) Ponto 5; (P6) Ponto 6; (P7) Ponto 7; (F.O) Frequência de ocorrência; (-) Dados ausentes.

F.O (%)	2025							2024							Tonalidade
	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	
F	-	-	1,3	4,7	-	1,0	4,3	-	1,8	-	1,3	-	-	3,9	Amarelo (Am)
F	-	5,3	4,7	1,9	-	3,1	2,9	-	1,8	1,1	-	-	5,2	2,9	Azul (Az)
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,9	Cinza (C)
PF	-	-	-	0,9	0,4	-	-	-	-	2,3	-	-	-	-	Laranja (L)
PF	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	2,3	0,0	4,7	-	-	Marrom (M)
PF	-	-	-	0,9	-	19,8	-	-	-	-	-	-	-	1,0	Rosa (R)
MF	2,4	-	-	5,7	0,4	10,4	15,9	-	1,8	1,1	8,9	2,3	-	2,9	Verde (Verd)
PF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9	1,0	Vermelho (Verm)
MF	97,6	94,7	89,3	85,8	99,3	65,6	76,8	100,0	94,7	93,1	89,7	93,0	93,9	86,4	Transparente (T)
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	Total

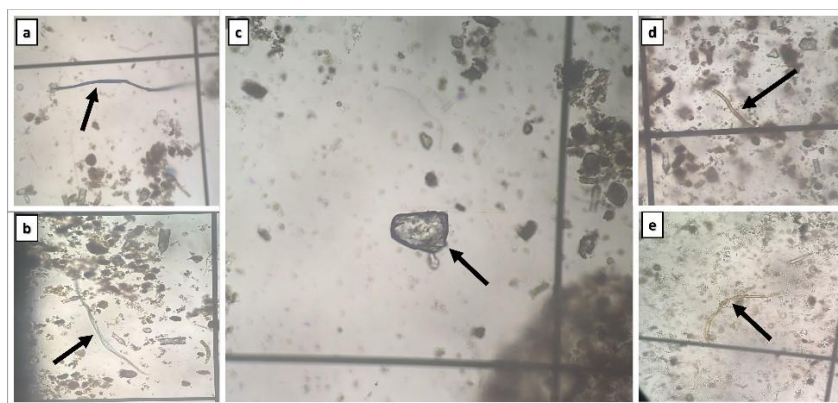


Figura 3. Fragmentos de microplásticos encontrado nas amostras analisadas. (a) fragmento azulado; (b-c) fragmentos transparentes; (d-e) fragmentos amarelados.

4. CONCLUSÃO

Foi possível observar no presente estudo, maior abundância e frequência de microplásticos transparentes (MPs) na água, devido ao acúmulo e lançamento dos efluentes pelo emissário submarino e riacho salgadinho, regiões próximas ao Porto de Maceió. Essa predominância também pode ter ocorrido, uma vez que os microplásticos permanecem no ambiente por longos períodos e devido as intemperismo ambiental, podem ter desbotados.

REFERÊNCIAS

1. CASTRO, C. P. N. (Org.). *Revitalização da bacia hidrográfica do rio São Francisco: histórico, diagnóstico e desafios*. Brasília: IPEA, 2019. 366p.
2. ROJAS, R. R. *et al.* Microplastic occurrence in fish species from the Iquitos region in Peru, western Amazonia. *Acta Amazonica*, 53(1), 65-72, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392202201212>
3. AMOBONYE, A. *et al.* Environmental Impacts of Microplastic and Nanoplastics: A Current Overview. *Frontiers in Microbiology*, 12, 768297, 2021. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.768297>
4. YANG, L. *et al.* Microplastic in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of The Total Environment*, 780, 146546, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146546>
5. WALDMAN, W. R.; RILLIG, M. C. Microplastic Research Should Embrace the Complexity of Secondary Particles. *Environmental Science and Technology*, 54(13), 7751–7753, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02194>
6. CANESI, L. *et al.* Evidence for immunomodulation and apoptotic processes induced by cationic polystyrene nanoparticles in the hemocytes of the marine bivalve *Mytilus*. *Marine Environmental Research*, 111, 34-40, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.008>
7. WONG, J. K. H.; LEE, K. K.; TANG, K. H. D.; YAP, P. 2020. Microplastic in the freshwater and terrestrial environments: Prevalence, fates, impacts and sustainable solutions. *Science of The Total Environment*, 719:137512.
8. QIAO, R. *et al.* Microplastics induce intestinal inflammation, oxidative stress, and disorders of metabolome and microbiome in zebrafish. *Science of The Total Environment*, 662, 246-253, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.245>
9. PANNETIER, P. *et al.* Environmental samples of microplastic induce significant toxic effects in fish larvae. *Environment International*, 134, 105047, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105047>
10. GARCIA, T. D. *et al.* Ingestion of microplastic by fish of different feeding habits in urbanized and nonurbanized streams in Southern Brazil. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 231, p. art. 434, 2020.
11. DANTAS FILHO, J. V. *et al.* First evidence of microplastics in freshwater from fish farms in Rondônia state, Brazil. *Heliyon*, 9(4), e15066, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15066>
12. RICE, E. W.; BRIDGEWATER, L. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21ed. Washington, D.C: American Public Health Association, 2012. ISBN: 9780875530475, 0875530478.
13. MATEUCCI, S.; COLMA, A. La metodología para el estudio de la vegetación. Colección de monografías científicas. *Serie Biología*, v. 22, p. 1-168, 1982.
14. LOBO, E.; LEIGHTON, G. Estructuras comunitarias de las fitocenosis planctónicas de los sistemas de desembocaduras de ríos y esteros de la zona central de Chile. *Biología Marina*, v. 22, p. 1-29, 1986.

Entre Turismo e Conservação: A Necessidade de Atualização da Legislação para Piscinas Naturais Urbanas

Danielle Rose dos Santos ¹, Marcelo Reis ²

¹ Programa de Pós-Graduação em Análise de Sistemas Ambientais - CESMAC;
danirosee25@gmail.com;

² Programa de Pós-Graduação em Análise de Sistemas Ambientais - CESMAC;
marcelo.reis@cesmac.edu.br;

* Correspondência: danirosee25@gmail.com;

Resumo: A intensificação do turismo em ambientes costeiros tem gerado impactos significativos sobre ecossistemas marinhos frágeis, exigindo estratégias de conservação e gestão sustentável. Este estudo tem como objetivo avaliar os impactos ambientais do turismo na Piscina Natural da Pajuçara (Maceió/AL), identificar lacunas na legislação vigente e propor regulamentações que conciliem preservação ecológica, uso recreativo e economia local. A pesquisa adota o framework de Limites de Mudança Aceitável (LAC) para monitorar biodiversidade, complexidade estrutural e percepção social sobre o uso do recife para que os resultados subsidiem políticas públicas, educação ambiental e um modelo de governança participativa que promova a conservação das piscinas naturais e a sustentabilidade do turismo em Maceió.

Palavras-Chave: Turismo Sustentável; Conservação Marinha; Gestão Ambiental; Legislação Ambiental; Conflitos de Uso.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação do turismo em ambientes costeiros tem gerado impactos significativos sobre ecossistemas marinhos frágeis, exigindo estratégias de conservação e gestão sustentável [1, 2]. Com o objetivo de avaliar os impactos ambientais do turismo na Piscina Natural da Pajuçara (Maceió/AL) e identificar lacunas na legislação vigente e propor regulamentações que conciliem preservação ecológica foi elaborada essa pesquisa adotando uma abordagem exploratória, bibliográfica e qualitativa, integrando análise documental e coleta de indicadores ecológicos.

A degradação ambiental resultante da exploração desordenada dos recursos naturais constitui um dos maiores desafios globais contemporâneos [3]. No contexto dos ambientes marinhos, os efeitos antrópicos têm provocado desequilíbrios que comprometem ecossistemas, biodiversidade e o bem-estar das comunidades costeiras, demandando a adoção de práticas de desenvolvimento sustentável, conforme preconizado pela Agenda 2030 da ONU e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável [4], em especial o ODS 14 – Vida na Água [4]. No Brasil, e de forma particular na região Nordeste, o turismo tem se expandido rapidamente, tornando-se um dos principais vetores de pressão sobre ecossistemas costeiros e recifais.

Em Alagoas, as piscinas naturais da Pajuçara, localizadas na área urbana de Maceió, configuram-se como um dos principais atrativos turísticos do estado. Historicamente utilizadas para pesca de subsistência e lazer, essas áreas recifais vêm sofrendo crescente pressão da atividade turística, sobretudo a partir da década de 1980, o que tem gerado impactos visíveis no ecossistema local e colocado em risco tanto a biodiversidade marinha quanto a sustentabilidade econômica dos jangadeiros e pescadores que dependem da região [5-7].

Apesar da relevância ecológica e socioeconômica do local, ainda não há registro sistematizado de indicadores ambientais, tampouco regulamentações claras sobre os tipos e intensidades de uso das piscinas naturais. Essa lacuna de gestão ambiental tem favorecido a intensificação dos impactos negativos e dificultado a conciliação entre exploração turística e preservação. Nesse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento de estudos que avaliem de forma sistemática os impactos do turismo, proponham estratégias de regulamentação participativa e estimulem programas de educação ambiental e governança local, visando assegurar a conservação das piscinas naturais da Pajuçara e a sustentabilidade do turismo na região.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado um levantamento bibliográfico para analisar a legislação ambiental relacionada ao uso de espaços naturais para recreação, com ênfase nas piscinas naturais, incluindo leis criadas pelos três entes federativos voltadas à conservação de ecossistemas costeiros e marinhos, incluindo normas que regulamentam o uso sustentável das piscinas naturais, garantindo proteção ambiental e segurança aos frequentadores. Além disso, foram examinadas legislações de outros locais turísticos com regulamentações específicas para o acesso a piscinas naturais, como Maragogi (AL), onde a lei define claramente condições de visitação, limites de capacidade e regras de conduta para os visitantes, servindo como referência para boas práticas.

A legislação municipal de Maceió, vigente desde outubro de 2014 (Lei 6345 de 02 de outubro de 2014) foi analisada criticamente, observou-se lacunas significativas como a falta de uma definição de capacidade máxima de visitantes ao dia, interferindo diretamente na capacidade de regeneração do ecossistema local, ao passo que não garante segurança ambiental nem para os frequentadores e não está alinhada com o crescimento exponencial do turismo no município entre 2014 e 2025.

Esse aumento significativo na procura pelo destino turístico reforça a necessidade de atualização da legislação, considerando práticas de governança local que conciliem conservação ambiental, preservação cultural e geração de empregos, já que as piscinas naturais são patrimônios culturais e econômicos relevantes para a comunidade.

3. RESULTS

3.1. *Análise da legislação que interfere diretamente no uso das piscinas naturais da Pajuçara.*

A Lei nº 6.345/2014, que regula os passeios turísticos de embarcações nas orlas marítima e lagunar de Maceió, foi concebida com o objetivo de organizar uma atividade de grande relevância econômica e turística, ao mesmo tempo em que busca garantir segurança, proteção ambiental e qualidade do serviço prestado. Entretanto, uma análise aprofundada revela que, apesar de suas intenções formais, a lei apresenta fragilidades estruturais e operacionais que comprometem significativamente sua efetividade prática e seu potencial de impacto positivo tanto sobre os prestadores de serviços quanto sobre os turistas e o meio ambiente. Um dos pontos a serem repensados são os requisitos para o credenciamento das embarcações, embora a lei defina requisitos básicos — como a posse de embarcação navegável, habilitação adequada do condutor, participação em seminário anual de sensibilização turística e cumprimento das normas sanitárias —, o credenciamento necessita de normas ambientais mais objetivas quando às características das embarcações, como por exemplo a impossibilidade do uso de motor próximo às áreas de conservação das piscinas naturais, para que se evite atuação de embarcações irregulares e incompatíveis com a conservação local.

Além disso, a lei apresenta uma forte dependência de vários órgãos para fiscalização e execução: DMTT, Capitania dos Portos, Vigilância Sanitária, Corpo de Bombeiros, Instituto do Meio Ambiente de Alagoas (IMA) e Polícia Militar. Embora a coordenação entre essas entidades seja desejável, a legislação não define mecanismos claros para assegurar essa cooperação. Na prática, isso gera lacunas na fiscalização e morosidade na aplicação das normas. Um exemplo concreto observado em cidades turísticas brasileiras é a atuação descoordenada entre fiscalização municipal e Capitania dos Portos, que muitas vezes permite que embarcações operem sem autorização adequada, causando risco aos usuários e ao ecossistema.

3.1 *Necessidade da tomada de decisões.*

O Conselho Gestor, previsto como órgão colegiado consultivo e deliberativo, criado pela lei em questão, apresenta preocupações com a situação atual do uso da piscina natural, sendo convocado recentemente pelo Ministério Público de Alagoas para prestar esclarecimentos acerca dos eventos chamados “Banho de Lua” que têm se tornado uma problemática ambiental na região costeira de Maceió, ficando clara a necessidade de atualização da legislação atual para que a legislação de Maceió se enquadre na nova realidade do turismo, que exige uma definição de regras claras para o uso do espaço público aquático.

A lei nº 6.345/2014, confia no Conselho para deliberar sobre limites de embarcações, medidas de fiscalização e aplicação de sanções, mas não estabelece prazos nem protocolos claros, o que compromete a agilidade e a efetividade das ações. Comparativamente, legislações de cidades como Maragogi (AL) ou Fernando de Noronha (PE) preveem regras mais objetivas para limitar a quantidade de embarcações e horários de operação, garantindo maior controle ambiental e segurança turística.

Outro ponto crítico é a ênfase na abordagem punitiva, com multas, suspensão e cassação do credenciamento. Embora a punição seja necessária, a lei carece de medidas preventivas e educativas contínuas. Não há programas de capacitação periódica, campanhas de conscientização ambiental ou incentivo à conformidade voluntária, estratégias que poderiam reduzir infrações e melhorar a qualidade do serviço turístico. Na ausência de políticas educativas, os prestadores dependem exclusivamente da fiscalização, e infrações recorrentes tornam-se inevitáveis.

3.3. *Necessidade de ampliação legislativa*

A lei atual apresenta dependência significativa de decretos complementares para regulamentar questões operacionais essenciais, como horários, valores cobrados, restrições de trânsito e proteção ambiental. Sem esses decretos, a lei permanece incompleta, limitando sua aplicabilidade prática e aumentando a vulnerabilidade do ecossistema local. Por exemplo, a falta de regulamentação clara sobre horários de passeio e número máximo de embarcações pode gerar sobrecarga ambiental, erosão costeira e poluição, especialmente em áreas sensíveis da orla e lagunas. A inobservância da criação desses decretos está gerando uma degradação ambiental acentuada derivada da falta de mecanismos suficientes para avaliação e monitoramento contínuo do impacto ambiental. Em outras cidades turísticas, a ausência de fiscalização efetiva contribuiu para degradação de ecossistemas marinhos, acúmulo de resíduos e riscos à biodiversidade. Em Maceió, passeios turísticos irregulares ou superlotados podem causar danos irreversíveis aos recifes e à fauna local, enquanto a segurança dos turistas fica comprometida pela operação de embarcações inadequadas ou mal conduzidas.

Quando comparada com legislações de referência em turismo náutico, como Maragogi (AL), Porto de Galinhas (PE) e Fernando de Noronha (PE), a lei de Maceió se mostra menos robusta em critérios operacionais e de fiscalização preventiva. Nessas localidades, há limites claros de embarcações por passeio, fiscalização constante de condutores e embarcações, monitoramento ambiental sistemático e programas educativos contínuos para prestadores de serviço.

4. **DISCUSSÃO**

O levantamento bibliográfico permitiu identificar que a legislação vigente carece de mecanismos de gestão adaptativa e indicadores claros de impacto ambiental e social, evidenciando a necessidade de revisão para compatibilizar o uso recreativo com a sustentabilidade do ecossistema recifal e atender às demandas de visitantes nacionais e internacionais. Comparativos com outros destinos turísticos demonstraram que é possível conciliar proteção ambiental, experiência segura para os visitantes e benefícios socioeconômicos para a população local, servindo como modelo para a atualização da lei municipal de Maceió.

Além disso, a avaliação da bibliografia pertinente permitiu uma abordagem sistemática para reunir e analisar informações relevantes. Esse processo incluiu a revisão crítica de regulamentações vigentes, abrangendo leis, portarias e normativas já estabelecidas para a gestão e conservação das piscinas naturais da Pajuçara. Além disso, os estudos dos documentos institucionais provenientes de órgãos governamentais, ambientais e do setor de turismo, permitem o arcabouço normativo que orienta as atividades na área estudada.

Uma recomendação para futuras avaliações da cobertura e complexidade estrutural dos recifes, envolve metodologias de transectos visuais, alinhada à framework de conservação como os Limites de Mudança Aceitável (*Limits of Acceptable Change* LAC) [8], que é extremamente relevante na gestão de áreas naturais e recreativas, incluindo espaços aquáticos frequentados por pessoas, porque oferece uma abordagem proativa e quantitativa para equilibrar o uso humano e a conservação ambiental.

O LAC é um framework de gestão que estabelece limites claros para mudanças ambientais ou sociais aceitáveis em um determinado espaço, considerando a capacidade de suportar impacto sem comprometer a integridade do ecossistema ou a experiência do usuário. No contexto de áreas aquáticas, isso significa definir quanto impacto causado pela presença humana (número de visitantes, comportamentos, infraestrutura) é considerado tolerável antes que o ambiente seja degradado, permitindo monitorar indicadores ambientais, como turbidez da água, cobertura vegetal ou número de espécies, e definir limites de alteração que não comprometam o equilíbrio do ecossistema.

5. CONCLUSÕES

O estudo demonstra que a intensificação do turismo nas piscinas naturais urbanas, como a da Pajuçara (Maceió/AL), demanda regulamentações mais atualizadas e eficazes, uma vez que a legislação vigente apresenta lacunas quanto à capacidade de carga, proteção ambiental e fiscalização. A adoção de frameworks como os Limites de Mudança Aceitável (LAC), associada a práticas de monitoramento contínuo, gestão adaptativa e programas educativos, pode orientar decisões de manejo que conciliem conservação da biodiversidade, segurança dos visitantes e desenvolvimento socioeconômico local. Assim, a atualização da legislação, aliada à gestão participativa e baseada em evidências, é essencial para equilibrar turismo, preservação ambiental e valorização cultural, assegurando a sustentabilidade das piscinas naturais e sua relevância ecológica, econômica e social.

REFERÊNCIAS

- Desa, U., *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. 2016.
- Kopnina, H., *Education for the future? Critical evaluation of education for sustainable development goals*. The Journal of Environmental Education, 2020. **51**(4): p. 280-291.
- Lee, B.X., et al., *Transforming our world: implementing the 2030 agenda through sustainable development goal indicators*. Journal of public health policy, 2016. **37**: p. 13-31.
- Trolle, D., et al., *Effects of changes in land use and climate on aquatic ecosystems: Coupling of models and decomposition of uncertainties*. Science of the Total Environment, 2019. **657**: p. 627-633.
- Correia, M. and H. Sovierzoski. *Macrobenthic diversity reaction to human impacts on Maceió coral reefs, Alagoas, Brazil*. in *Proc. 11th Intern. Coral Reef. Symp.* 2010.
- Melo, J.C., *A emergência da urbanização turística com base na rede hoteleira da cidade de Maceió-Alagoas*. 2017.
- Silva, G.D., *Fauna associada a esponjas em ambiente recifal da Ponta Verde, Maceió, Alagoas, com ênfase em anelídeos*. 2024.
- Stankey, G.H., et al., *The limits of acceptable change (LAC) system for wilderness planning*. Gen. Tech. Rep. INT-GTR-176. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 37 p., 1985. **176**.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Esclarecendo sobre a seleção de alimentos e ingestão de microplásticos em zebrafish (*Danio rerio*): um estudo experimental

Lucia Vanessa Rocha Santos ^{1*}, Raíla Maria Bulhões Barrosa ¹, Lúcio José Lima da Silva Júnior^{1,c}, Lázaro Wender Oliveira de Jesus², Guilherme Ramos Demétrio³, Robson G Santos¹

¹ ECOA LAB, Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brazil

² Laboratório de Morfofisiologia Animal Aplicada, Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil

³ Plant Ecology Lab (LEVE), Universidade Federal de Alagoas, Campus Arapiraca, Unidade Educacional Penedo, Penedo, AL, Brasil

* Correspondence: biolucia.vanessa@gmail.com

Resumo: A ingestão de plástico por animais é amplamente reconhecida, mas suas causas ainda são pouco compreendidas. A literatura sugere que esse comportamento pode representar uma armadilha evolutiva, onde os organismos confundem plástico com presas naturais devido a pistas sensoriais semelhantes. No entanto, ainda são escassas as evidências experimentais que testam os mecanismos envolvidos. Utilizando o zebrafish (*Danio rerio*) como organismo modelo, foi avaliado como a ingestão de microplásticos é influenciada pela semelhança entre plástico e alimento, pela disponibilidade de plástico no ambiente e pelo estado alimentar dos indivíduos. Os resultados indicaram o aumento da disponibilidade de plástico no ambiente influencia na ingestão de plástico. Que existe uma tendência alimentar dos peixes de preferência por partículas vermelhas, associadas a uma maior semelhança com presas naturais, tanto quando as partículas foram oferecidas isoladamente, quanto de modo misto (vermelho + azul). Em adicional, a privação alimentar por 24 horas levou a um aumento na ingestão de plástico, com preferência pelas partículas vermelhas consumidas em quantidade duas vezes maior do que as azuis. Esses achados evidenciam que a ingestão de plástico pode ser uma armadilha evolutiva, tornando os animais cada vez mais suscetíveis a consumir materiais não-nutritivos em resposta a estímulos ambientais.

Palavras-chave: poluição, armadilha evolutiva, poluição plástica, comportamento alimentar.

1. INTRODUÇÃO

A produção global de plástico alcançou 400,3 milhões de toneladas em 2022, representando um crescimento exponencial desde os 1,5 milhão de toneladas produzidos na década de 1950 [1]. A ingestão de plástico já foi registrada em mais de 1.500 espécies [2], sendo cerca de 1.200 marinhas, com destaque para os peixes como um dos grupos mais afetados [3,2]. Em ambientes de água doce, embora os estudos sejam menos numerosos, evidências recentes indicam que a ingestão por essas espécies pode ser comparável à de organismos marinhos em áreas contaminadas, variando de 1 a mais de 20 partículas por indivíduo [4,5].

Entre as possíveis causas, destaca-se o fenômeno de armadilha evolutiva, no qual mudanças ambientais rápidas transformam pistas ecológicas confiáveis em sinais enganosos, levando a decisões equivocadas [6,7]. O plástico, pela diversidade de cores, formas e texturas, pode mimetizar presas naturais, e até mesmo emitir odores que intensificam essa imitação sensorial [8], resultando em impactos significativos sobre a biodiversidade [9].

Estudos sugerem que fatores como estado nutricional dos organismos, alta disponibilidade ambiental de plástico e semelhança física com presas naturais influenciam a ingestão [2]. No entanto, ainda existem lacunas e inconsistências na literatura, reforçando a necessidade de investigações controladas. Trabalhos experimentais apontam que a fome aumenta a propensão ao consumo de partículas, especialmente quando estas se assemelham em cor e tamanho a presas reais [10,11].

Além disso, a alta densidade de partículas plásticas em um ambiente aumenta as chances de contato e ingestão. Compreender esses fatores é essencial para desenvolver estratégias de mitigação, como manipulação de estímulos visuais e olfativos ou redução da disponibilidade de plástico no habitat.

O presente estudo investigou três hipóteses: (i) maiores concentrações de microplásticos aumentam os níveis de ingestão; (ii) partículas plásticas com características visuais semelhantes às presas elevam a probabilidade de ingestão; e (iii) animais em estado de fome são mais propensos a consumir plástico. Para isso, utilizou-se *Danio rerio* como espécie modelo, considerando sua visão tetracromática e ampla caracterização fisiológica e comportamental, o que garante alta validade ecológica aos experimentos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados 720 exemplares adultos de *Danio rerio* selvagens, adquiridos de loja local e mantidos no biotério de peixes do ICBS-UFAL. Os animais foram aclimatados e submetidos a quarentena de 10 dias em aquários de 50 L com água reconstituída (ISO, 1996), separados por sexo após 48 h e mantidos sob condições controladas: densidade de 5 indivíduos/L, fotoperíodo 16L:8E, temperatura $27,3 \pm 0,61$ °C, pH $7,1 \pm 0,2$ e oxigênio dissolvido de $6,0 \text{ mg/L} \pm 0,2$, com salinidade, amônia e nitrato próximos a zero. O protocolo experimental foi aprovado pelo CEUA/UFAL (nº 10/2022).

Os microplásticos esféricos de polietileno (300–350 µm) nas cores azul e vermelha foram adquiridos da Cospheric Ltd. (EUA), contendo 85.031 partículas por grama. A alimentação foi realizada com náuplios de *Artemia salina* desencapsulada, na proporção de 2% da biomassa úmida por dia.

Os experimentos ocorreram em aquários independentes de 4 L, cada um com 15 peixes (8 fêmeas e 7 machos), totalizando 5 réplicas por tratamento. Antes de cada teste, os animais foram mantidos em jejum por 24 h. O Experimento 1 avaliou o efeito da quantidade de plástico sobre a ingestão, utilizando três concentrações: baixa ($0,0001 \text{ g/L}$; 8 partículas/L), média ($0,001 \text{ g/L}$; 80 partículas/L) e alta ($0,01 \text{ g/L}$; 800 partículas/L). O Experimento 2 investigou a influência da similaridade visual com o alimento, ofertando partículas apenas vermelhas, apenas azuis ou uma mistura das duas cores ($0,001 \text{ g/L}$; 80 partículas/L). O Experimento 3 analisou o efeito da saciedade, alimentando os animais após períodos de 30 min, 1 h, 2 h ou 24 h de jejum, sempre com a mesma concentração média de partículas.

Em todos os experimentos, as partículas foram ofertadas junto com a artêmia e o tempo de exposição foi de 1 hora. Após esse período, os peixes foram eutanasiados e os intestinos dissecados para contagem das partículas sob estereomicroscópio.

A análise estatística foi realizada no RStudio, utilizando o teste de Kruskal–Wallis para comparações entre tratamentos, seguido do teste de Dunn com correção de Bonferroni. Para o Experimento 3, empregou-se modelo linear generalizado com distribuição binomial negativa (glm.nb, pacote MASS). A visualização gráfica foi feita com o pacote ggplot2.

3. RESULTADOS

3.1 Experimento 1- A Disponibilidade de plástico

A quantidade total de partículas plásticas ingeridas pelos peixes variou significativamente entre os tratamentos, evidenciando uma relação positiva entre a disponibilidade ambiental de plástico e o consumo desses materiais (Figura 1). No tratamento 1 (baixa concentração), a média de ingestão foi de $3,5 \pm 3,2$ partículas por indivíduo. No tratamento 2 (concentração média), esse valor aumentou para $22,4 \pm 11,0$ partículas, representando um acréscimo absoluto médio de 18,9 partículas e um aumento de aproximadamente 6,4 vezes em relação ao tratamento 1. No tratamento 3 (alta concentração), a ingestão média atingiu $215,6 \pm 73$ partículas por indivíduo — cerca de 61,6 vezes maior que no tratamento 1, com um acréscimo médio absoluto de 212,1 partículas. O teste de Kruskal–Wallis indicou diferenças estatísticas significativas entre todos os grupos ($p < 0,05$) (Tabela 1), demonstrando que cada aumento na concentração ambiental de microplásticos resultou em um aumento progressivo e significativo na ingestão pelas amostras analisadas (Fig. 1).

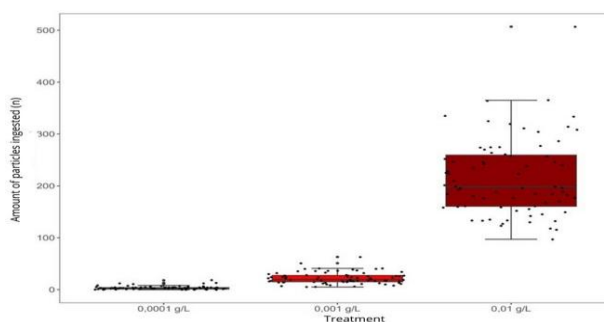


Fig. 1- Quantidade de microplásticos ingeridos por zebrafish adultos expostos a diferentes concentrações de partículas plásticas fluorescentes vermelhas, nas três concentrações testadas: baixa (0,001 g/L), média (0,01 g/L) e alta (0,1 g/L).

3.2 Experimento 2- A influência da cor com a semelhança do alimento

Nossos resultados demonstram que a cor das partículas de microplástico influencia significativamente a ingestão por zebrafish, com uma clara preferência por partículas vermelhas (Figura 2), as quais apresentam similaridade de cor com o alimento. Na análise da ingestão de partículas por cor, no tratamento onde apenas partículas vermelhas foram oferecidas, a ingestão média foi de $11,7 (\pm 6,1)$ partículas por indivíduo. No tratamento com apenas partículas azuis, a média foi de $6,3 (\pm 5,7)$. A comparação estatística entre esses dois tratamentos, utilizando o teste de Kruskal-Wallis revelou que houve um maior número de ingestão de partículas vermelhas em comparação com as azuis ($p < 0,05$).

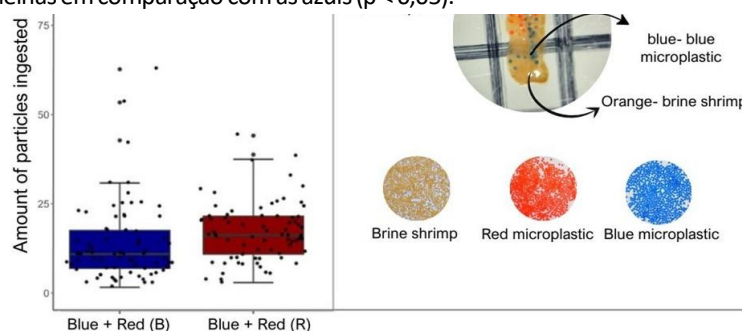


Fig. 2- Quantidade de partículas de microplásticos fluorescentes ingeridas por zebrafish adultos nos diferentes tratamentos. A- O gráfico apresenta a distribuição da ingestão de partículas plásticas, com destaque para as cores azul (B) e vermelho (R) no tratamento misto. B- Imagem do conteúdo intestinal dos zebrafish. as partículas indicadas laranja correspondem às Artemia, enquanto as vermelhas e azuis representam microplásticos. Abaixo, imagem representativa dos microplásticos e artemia utilizados no estudo.

3.3 Experimento 3- Saciedade

Nossos resultados demonstraram que, em todos os tratamentos experimentais, a ingestão de partículas vermelhas foi consistentemente maior do que a de partículas azuis (Figura 3). Esse padrão se manteve independentemente do tempo de jejum ao qual os zebrafish foram submetidos, sugerindo uma possível preferência visual ou comportamental pela cor vermelha (ver tabela 4). O modelo linear generalizado indicou efeitos estatisticamente significativos do tempo de jejum e da cor das partículas sobre a ingestão de plásticos pelos zebrafish ($p < 0,001$). Observou-se que, com o aumento do tempo de jejum, o número médio de partículas ingeridas também aumentou, exceto no intervalo de 2 horas (120 minutos) que não seguiu essa tendência (Fig. 3).

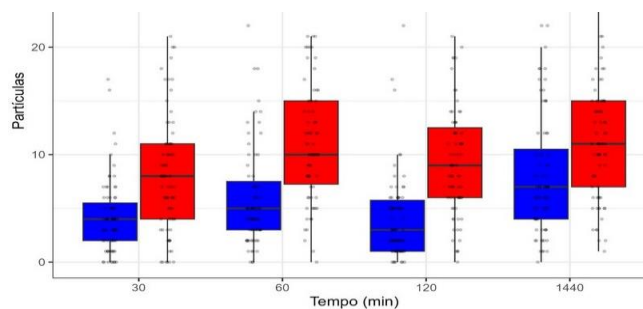


Fig 3. Relação entre a quantidade de partículas e as variáveis explicativas tempo e cor, ajustada por um modelo de regressão linear generalizado (GLM).

4. DISCUSSÃO

Nossos resultados demonstram que três fatores cruciais — a disponibilidade de plástico, a semelhança entre plástico e alimento, e o nível de saciedade — influenciam diretamente a ingestão de partículas plásticas por zebrafish adultos. Esta descoberta é de grande importância porque corrobora e experimentalmente valida teorias anteriores que relacionam a crescente presença de plástico no ambiente com um risco elevado de ingestão por animais [2]. Ao quantificar o aumento do consumo com a maior oferta de plástico (Experimento 1), a preferência por cores que mimetizam presas naturais (Experimento 2), e a maior suscetibilidade de animais em jejum à ingestão de não-alimento (Experimento 3), evidenciam de forma concreta os riscos significativos que a fauna enfrenta em ambientes poluídos, fornecendo mecanismos subjacentes a essa vulnerabilidade.

Nossos achados indicam que a maior disponibilidade de partículas plásticas no ambiente está associada a um aumento na ingestão desses materiais pelos organismos, como evidenciado pelos resultados do Experimento 1. À medida que a quantidade de plástico no meio ambiente cresce, ocorre um aumento na diversidade de sinais que podem ser confundidos com alimento, como diferentes tamanhos, formas e cores [9–11]. Essa ampliação da diversidade de estímulos alimentares artificiais eleva as taxas de encontro com partículas plásticas porque, ao apresentar uma vasta gama de morfologias e colorações, o plástico aumenta a probabilidade de que alguma de suas variações mimetize os diferentes tipos de presas naturais que um organismo busca. Essencialmente, quanto mais formas, cores e tamanhos o plástico assume, maior a chance de que um desses 'disfarces' acione os mecanismos de reconhecimento de alimento do animal [10,12,13]. Isso desafia ainda mais a capacidade dos organismos de distinguir entre presas naturais e resíduos prejudiciais, aumentando os riscos de ingestão inadvertida [8].

Em relação à variação de cor, observamos que zebrafish ingeriram preferencialmente esferas vermelhas — mais semelhantes às cores presentes nas presas naturais desses peixes — em comparação com as esferas azuis, independentemente de serem oferecidas isoladamente ou em conjunto. Animais com visão desenvolvida, como o zebrafish, utilizam pistas visuais, como a cor [14,15], para identificar e selecionar alimentos no ambiente natural. No caso do zebrafish, suas presas naturais consistem principalmente em pequenos invertebrados aquáticos, como larvas de insetos e microcrustáceos, que geralmente apresentam tonalidades avermelhadas, amareladas ou translúcidas [16], enquanto a cor azul é rara nesse contexto. Em nosso estudo, zebrafish passou por um período de alimentação apenas com artêmia (coloração vermelha) para que associasse esse alimento como alimento natural. Dessa forma, a preferência pelas esferas vermelhas pode estar relacionada à semelhança dessas partículas com as presas naturais, facilitando seu reconhecimento.

Dessa forma, os animais selecionam seus alimentos com base em padrões sensoriais desenvolvidos ao longo da evolução, utilizando principalmente pistas visuais, olfativas e táteis associadas às presas naturais [5,6,2]. No entanto, quando resíduos plásticos apresentam características semelhantes a essas presas — como cor, forma ou tamanho —, podem acionar os mesmos mecanismos de reconhecimento alimentar, levando os organismos a escolhas equivocadas [5,6]. Essa confusão sensorial faz com que objetos artificiais, como microplásticos de cor vermelha, por exemplo, sejam ingeridos seletivamente, mesmo que não possuam valor nutricional, o que pode comprometer a saúde e o desempenho dos indivíduos afetados.

No ambiente, os plásticos apresentam diferentes graus de mimetismo, seja por atributos visuais como cor, tamanho e textura, seja por sinais químicos emitidos após a colonização por biofilmes, que podem simular odores de alimento [7]. No entanto, além das pistas visuais,

outros fatores sensoriais — como tamanho, forma e movimento das partículas — podem atuar isoladamente ou em conjunto para ativar os mecanismos de reconhecimento alimentar dos organismos. Esses mecanismos, contudo, não são completamente eficientes, como demonstram estudos anteriores que registraram a ingestão de microplásticos mesmo quando misturados a presas naturais [17–19]. Dessa forma, embora a teoria da armadilha evolutiva [5,6] forneça uma estrutura conceitual sólida para explicar parte do consumo de microplásticos, nossos resultados indicam que ela não contempla toda a variabilidade observada. Por exemplo, partículas visivelmente distintas das presas naturais, como as de cor azul, foram ingeridas pelos zebrafish, ainda que em menor quantidade. Embora as pistas visuais desempenhem papel fundamental na seleção alimentar, sua eficácia pode ser reduzida quando outras características sensoriais — como o formato ou o tamanho dos fragmentos — ganham predominância.

Outro fator relevante é o estado de saciedade. No Experimento 3, observamos que a ingestão de partículas aumentou significativamente à medida que o tempo de jejum se prolongou, atingindo um pico após 24 horas. Esse padrão está alinhado com a ideia de que, sob privação alimentar, os organismos tornam-se mais suscetíveis a erros de seleção, reduzindo seus critérios de escolha e ampliando a ingestão de itens de baixo valor nutricional, como os plásticos [2]. Evolutivamente, os animais enfrentam o desafio de equilibrar dois tipos de erro: consumir itens que não oferecem benefício energético ou deixar de aproveitar recursos alimentares valiosos [2].

Estudos prévios já demonstraram que a escassez alimentar pode levar ao forrageamento indiscriminado em diferentes espécies animais, incluindo peixes [21,22]. Em nosso estudo, a ingestão de partículas plásticas aumentou progressivamente com o tempo de jejum, atingindo seu pico após 24 horas de privação alimentar. Esse padrão é compatível com a ideia de que a fome extrema reduz os critérios de seletividade dos organismos, aumentando sua suscetibilidade à ingestão de itens sem valor nutricional. Curiosamente, observamos uma ingestão menor após duas horas de jejum do que após uma hora. Essa flutuação pode estar relacionada à regulação hormonal do apetite. A grelina, hormônio orexígeno responsável por estimular a sensação de fome, apresenta níveis elevados durante os períodos iniciais de jejum em zebrafish, permanecendo altos por algum tempo mesmo após a alimentação [20]. No entanto, estudos sugerem que seus níveis começam a cair entre uma e três horas após o início da privação alimentar, o que pode explicar a menor ingestão observada após duas horas, seguida por um novo aumento após 24 horas, quando a demanda energética se torna crítica e os níveis de grelina voltam a se elevar. Esse mecanismo hormonal pode modular o comportamento alimentar ao longo do tempo de jejum, influenciando diretamente a seletividade dos peixes e favorecendo a ingestão de partículas plásticas em condições de fome extrema.

À medida que os plásticos se tornam mais abundantes e diversos nos ecossistemas aquáticos, há uma tendência de que esses materiais sejam cada vez mais confundidos com presas naturais. Isso pode gerar uma pressão comportamental e sensorial sobre as espécies, promovendo adaptações que as tornem ainda mais vulneráveis ao consumo de plástico. Tal cenário é preocupante, pois sugere um possível ajuste comportamental das populações à ingestão de resíduos plásticos, alterando as dinâmicas de forrageamento e impactando a saúde das populações de forma cumulativa e potencialmente irreversível.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam que a ingestão de partículas plásticas por zebrafish é influenciada por múltiplos fatores que atuam de forma integrada: a disponibilidade ambiental de plástico, a similaridade visual entre os plásticos e presas naturais e o estado de saciedade dos animais. Esses fatores não apenas afetam o comportamento alimentar, mas também ajudam a explicar por que os organismos são tão vulneráveis à ingestão de microplásticos em ambientes contaminados. Os três experimentos realizados demonstraram que: (i) a ingestão de plástico aumenta proporcionalmente à sua disponibilidade ambiental; (ii) há uma preferência por partículas que mimetizam características visuais das presas naturais, como a cor vermelha; e (iii) o jejum prolongado reduz a seletividade alimentar, favorecendo o consumo indiscriminado de partículas, inclusive aquelas visualmente distintas de alimentos. Em conjunto, esses achados fornecem evidências experimentais para a hipótese de que os microplásticos atuam como armadilhas evolutivas — estímulos artificiais que enganam os sistemas sensoriais dos animais, levando-os a tomar decisões inadequadas de forrageamento. Ao demonstrar os mecanismos que aumentam a probabilidade de ingestão de plástico, este estudo contribui para o entendimento dos impactos ecológicos da poluição plástica e potencialmente oferece informações para estratégias de mitigação mais eficazes.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL), (Processo nº 60030.0000001751/2022) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Declaração do Conselho de Ética em Pesquisa: O protocolo do estudo animal foi aprovado pelo Comitê de Ética no Uso de Animais da Universidade Federal de Alagoas, sob o número 10/2022.

Conflitos de interesse: Os autores não declaram conflitos de interesse

REFERENCES

1. Plastics Europe. (2023). Plastics - The Fast Facts 2023. Plastics Europe AISBL. Disponível em: <https://plasticseurope.org>
2. Santos, R. G., Machovsky-Capuska, G. E., & Andrades, R. (2021). Plastic ingestion as an evolutionary trap: Toward a holistic understanding. *Science*, 373(6550), 56–60.
3. Akindele, E. O., Ehlers, S. M., & Koop, J. H. (2019). First empirical study of freshwater microplastics in West Africa using gastropods from Nigeria as bioindicators. *Limnologia*, 78, 125708. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.125708>
4. Aljaibachi, R., Laird, W. B., Stevens, F., & Callaghan, A. (2020). Impacts of polystyrene microplastics on *Daphnia magna*: A laboratory and a mesocosm study. *Science of The Total Environment*, 705, 135800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135800>
5. Schlaepfer, M. A., Runge, M. C., & Sherman, P. W. (2002). Ecological and evolutionary traps. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(10), 474–480. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02505-8](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02505-8)
6. Robertson, H. A., Dowding, J. E., Elliott, G., Hitchmough, R., Miskelly, C., O'Donnell, C. F., ... & Taylor, G. A. (2013). Conservation status of New Zealand birds, 2012 (p. 22). Publishing Team, Department of Conservation.
7. Schuyler, Q., Hardesty, B. D., Wilcox, C., & Townsend, K. (2012). To eat or not to eat? Debris selectivity by marine turtles. *PLoS ONE*, 7(7), e40884.
8. Savoca, M. S., Machovsky-Capuska, G. E., Andrades, R., & Santos, R. G. (2022). Plastic ingestion: understanding causes and impacts. *Frontiers in Marine Science*, 9, 905336.
9. Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2013). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
10. Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, 178, 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>
11. Su, L., Xue, Y., Li, L., Yang, D., Kolandhasamy, P., Li, D., & Shi, H. (2021). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and treatment. *Water Research*, 191, 116814. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116814>
12. De Sá, L. C., Luis, L. G., & Guilhermino, L. (2015). Effects of microplastics on juveniles of the common goby (*Pomatoschistus microps*): Confusion with prey, reduction of the predatory performance and efficiency, and possible influence of developmental conditions. *Environmental Pollution*, 196, 359–362. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.10.021>
13. Ory, N. C., Sobral, P., Ferreira, J. L., & Amato, S. (2018). Amberstripe scad (*Decapterus muroadsi*) fish ingest blue microplastics resembling their copepod prey along the coast of Rapa Nui (Easter Island) in the South Pacific subtropical gyre. *Science of the Total Environment*, 586, 430–437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.016>
14. Hughes, A., et al. (1998). Cone contributions to the photopic spectral sensitivity of the zebrafish ERG. *Visual Neuroscience*, 15(6), 1029–1037. <https://doi.org/10.1017/S0952521998156120>
15. Spence, R., & Smith, C. (2008). Innate and learned colour preference in the zebrafish (*Danio rerio*). *Animal Behaviour*, 114, 582–588. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2007.09.012>
16. Spence, R., Gerlach, G., Lawrence, C., & Smith, C. (2008). The behaviour and ecology of the zebrafish, *Danio rerio*. *Biological Reviews*, 83(1), 13–34. <https://doi.org/10.1017/S1464793107006952>
17. Kim, S., Lee, J., Choi, H., & Kim, D. (2019). Ingestion of microplastics by zebrafish (*Danio rerio*) and its effects on the immune system. *Environmental Pollution*, 245, 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.022>
18. Sales-Ribeiro, D., Brito-Casillas, Y., Fernández, A., & Caballero, M. J. (2020). An end to the controversy over the microscopic detection and effects of pristine microplastics in fish organs. *Scientific Reports*, 10(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69062-3>
19. Duan, Z., et al. (2022). Diet preference of zebrafish (*Danio rerio*) for bio-based polylactic acid microplastics and induced intestinal damage and microbiota dysbiosis. *Environmental Pollution*, 292, 118380. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118380>
20. Hatef, B. (2015). Ghrelin O-Acyl Transferase in zebrafish is an evolutionarily conserved peptide upregulated during calorie restriction. *Peptides*, 71, 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2015.06.006>
21. Gregory, R. D. (2009). Foraging ecology and the role of hunger in food choice.
22. Roch, S., et al. (2021). Hunger and foraging behavior in freshwater fish: A review

First records of floating debris in the Costa dos Corais Environmental Protection Area from remote sensing (Sentinel 2/FDI)

Clarissa Nascimento Soares ^{1,2}, Thyago Anthony Soares Lima ^{4,5}, João Eduardo da Silva Mota ^{2,3}, Alessandro Sarmiento Cavalcanti ^{1,2}, Marcelo Reis ^{1,2} and Jessé Marques Pavão ^{1,2}

¹ Post-graduate Program in Analysis of Environmental Systems, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brazil.

² Emergency and Ecosystem Resilience Laboratory - LERE, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brazil.

³ Institute of Science and Technology, São Paulo State University (Unesp), São José dos Campos, SP, Brazil.

⁴ Graduate Program in Natural Disasters, (Unesp/Cemaden), São José dos Campos, SP, Brazil.

⁵ Graduate in Information Systems, Centro Universitário Cesmac, Maceió, AL, Brazil.

* Correspondence: clarissansoares@gmail.com

Abstract: Floating debris poses a significant threat to tropical reefs and local economies dependent on tourism and artisanal fishing. This study presents the first systematic records of this debris in the Coral Coast Environmental Protection Area (APACC), using optical remote sensing with Sentinel 2 MSI imagery and the Floating Debris Index (FDI), as well as NDVI and FAI to differentiate photosynthetic targets and macroalgae. The workflow included cloud masking, object segmentation, and morphological filtering. The 2024 analysis revealed 4.7129 km² of debris detected, with a monthly average of 0.3927 km². Strong seasonality was observed, with a peak in August (30.8% of the annual total) and high values between October and December. The JJA and SON stations concentrated 67.9% of the debris. This intensification is related to increased optical detectability, reef architecture that favors debris concentration, and seasonal anthropogenic pressure, especially in tourist areas such as Maragogi, São Miguel dos Milagres, and Tamandaré. Hotspots are concentrated between the coast and the outer reef, near urban river mouths. A monitoring protocol is proposed with Sentinel 2/FDI and Sentinel 1 SAR, validated in the field and integrated with tourism and precipitation data.

Keywords: Debris Index; Sentinel; marine litter; plastic debris; coral reefs; reef lagoon corridor; tourism; river discharge; coastal management

1. INTRODUCTION

In coastal regions, solid waste generation represents one of the most significant environmental challenges today, widely recognized as a global issue affecting ecosystems, economies, and coastal communities. The growing urbanization of these areas, combined with the intensification of tourism and commercial activities, contributes to the exponential increase in waste production, whose inadequate disposal compromises the integrity of marine environments [1]. The inefficiency of waste management systems has been highlighted by several studies as a critical factor in this context. More than a secondary factor, this structural deficiency is often considered the primary source of debris that ends up reaching the ocean, as evidenced by Stoll et al. [2]. The lack of effective public policies, limited collection and treatment infrastructure, and lack of public awareness further exacerbate the problem, making solid waste a persistent threat to marine biodiversity and human health.

Although other factors may influence this phenomenon, such as illegal dumping, industrial fishing, and maritime transport, the presence of waste in coastal areas is strongly associated with runoff from rivers and stormwater drainage channels. These systems act as vectors that transport discarded materials from urban and peri-urban areas directly to the sea, especially during heavy rainfall events. Furthermore, human activities, such as mass tourism, uncontrolled land use, and lack of basic sanitation, intensify the waste load released into the coastal environment [3].

Water quality is essential for living beings, but it has been compromised by pollution from debris, including plastic, which affects ecosystems and human health. To address this problem, it is necessary to improve the monitoring and analysis of plastic waste in aquatic environments. Remote sensing emerges as a promising, practical, and efficient tool for detecting and characterizing this pollution at different scales [4].

The availability of routine Sentinel 2 imagery has consolidated optical remote sensing as a complementary tool for floating debris detection, particularly when surface aggregations produce detectable NIR–SWIR (Near Infrared - Shortwave Infrared) signatures [5,6]. In Brazilian conservation units such as Coral Coast Environmental Protection Area (APACC), information gaps on the spatio temporal dynamics of debris still hinder prioritization of enforcement and clean up actions. Previous studies indicate that detection is jointly modulated by environmental conditions (turbidity, wind, sea state) and anthropogenic drivers (tourism, beach littering, boat traffic), often with strong seasonality [7]. We hypothesized that (i) Sentinel 2 series processed with FDI (Floating Debris Index) /NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) /FAI (Leaf Area Index) can map temporal and spatial patterns of floating debris in APACC at management relevant scales; and that (ii) the reef geometry and local pressures (rainfall/runoff and tourism) explain the concentration of hotspots 1–3 km from shore and the intensification from late winter into spring.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study area

APACC spans the northern Alagoas and southern Pernambuco coasts, encompassing fringing and barrier reefs approximately parallel to the shoreline, sandy banks and estuaries. Semidiurnal tides, trade winds and seasonally varying river discharge drive coastal hydrodynamics, with a wetter fall–winter and clearer waters during late winter–spring. The parallel reef system delineates semi sheltered reef lagoon corridors between the beach and the outer reef where wave breaking and return flow can establish near surface convergences that trap floating material. The most intensively visited destinations (Maragogi, São Miguel dos Milagres, Japaratinga and Tamandaré) host significant hotel infrastructure and boat traffic to natural pools, typically located within the 1–3 km band off the coast (Figure 1).

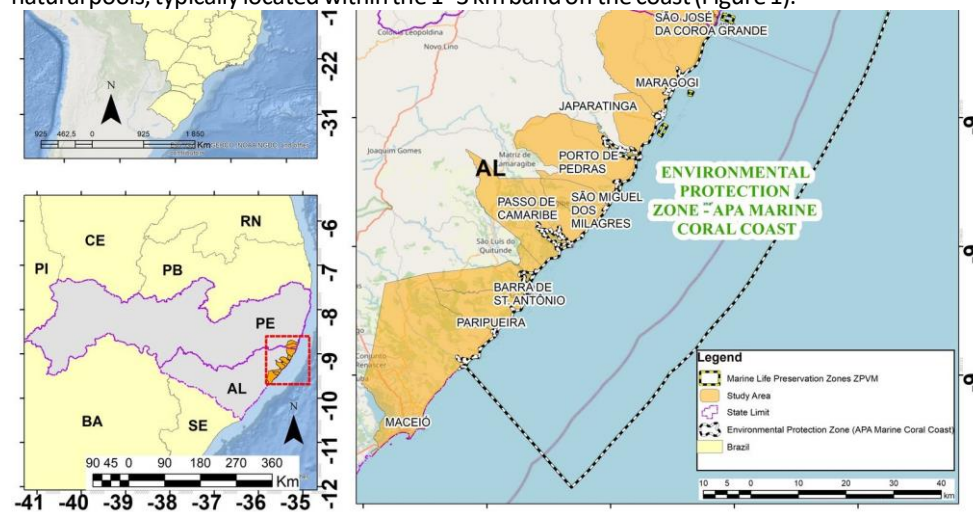


Figure 1. Left side, from top to bottom: Brazil highlighting the Northeast Region, Northeast Region highlighting the State of Alagoas and Pernambuco. Right side: zoom in on the study area (Coral Coast Environmental Protection Area).

2.2. Categorization of plastic debris

We used Sentinel 2 MSI Level 2A (surface reflectance), spatially subset to APACC and filtered by cloudiness. The bands were B5 (red edge, 705 nm), B8 (NIR, 842 nm), B8A (NIR*, 865 nm) and B11 (SWIR 1, 1610 nm), plus QA60 for clouds and cirrus [8]. Images were rescaled to reflectance (1/10000) and masked for water using NDWI with a 0.3 threshold [9, 10]. Following the original formulation, FDI was computed as the difference between the observed NIR and a linear baseline interpolated between a red edge band and SWIR 1 [5, 6]. We adopted the variant with $RE1 = B5$ and $SWIR1 = B11$, yielding.

To reduce confusion with biomass, we used NDVI [11] and FAI [12], complemented by multiband visual screening. Candidate pixels were selected by an FDI threshold (0.1) (Figure 2) and then separated into biogenic versus non biogenic using NDVI/FAI, followed by object based connected component analysis and light morphology. Final metrics included total monthly area (km²), seasonal sums and seasonal shares (DJF, MAM, JJA, SON). The pipeline was implemented on Google Earth Engine and parameterized drawing on prior experience along the northeastern Brazilian coast [7].

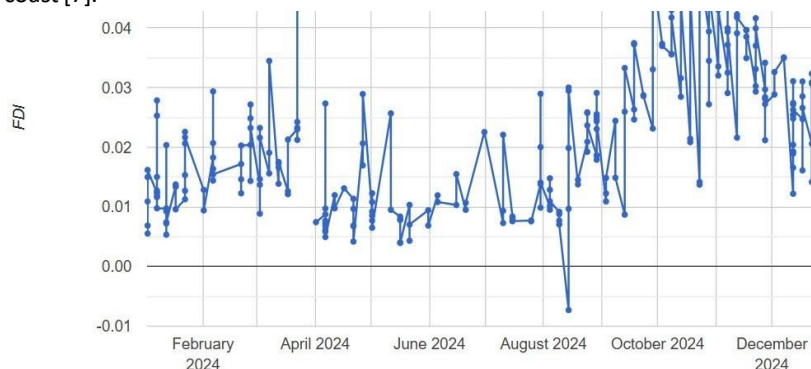


Figure 2. Behavior of the Floating Debris Index over time in 2024.

3. RESULTS

Applying the workflow to 1 January - 31 December 2024 yielded an annual total of 4.7129 km² of areas detected as floating debris candidates in APACC. The monthly mean was 0.3927 km² and the median 0.2878 km², indicating a skewed distribution dominated by an exceptional peak in August, when the monthly sum reached 1.4502 km² (30.8% of the annual total).

During the first semester, monthly areas ranged from 0.0838 to 0.3396 km²; during the last quarter they remained persistently high between 0.4860 and 0.5693 km². Seasonally, JJA summed 1.8682 km² (39.6%), SON 1.3318 km² (28.3%), DJF 0.9100 km² (19.3%) and MAM 0.6029 km² (12.8%). Figures 3-5 (monthly bars, cumulative curve and seasonal totals) visualize these patterns.

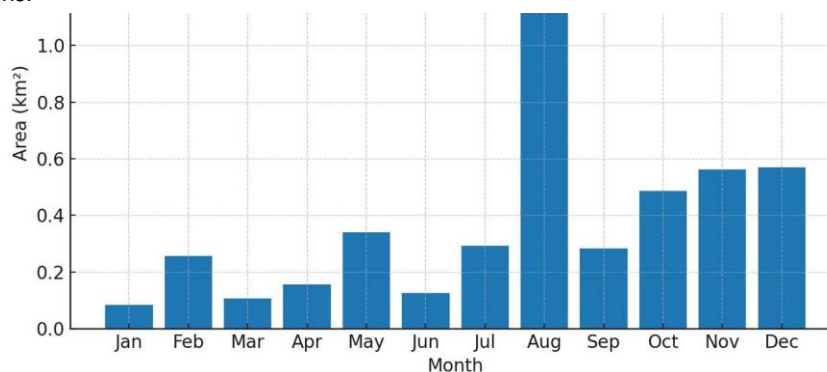


Figure 3. Monthly area of floating debris in APCC (km²).

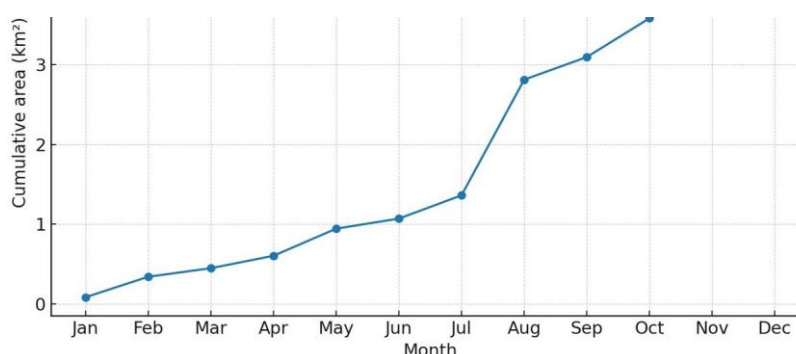


Figure 4. Cumulative area over the year (km²).

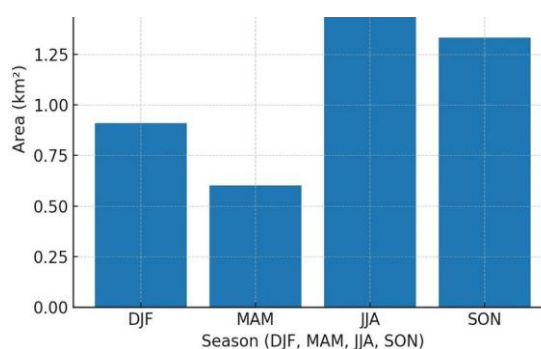
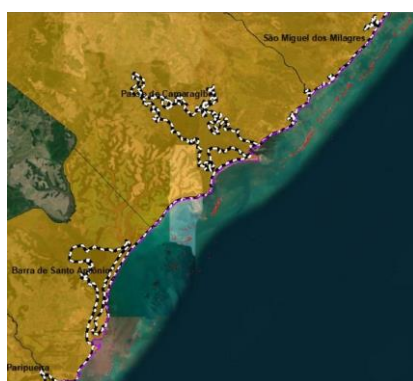


Figure 5. Total area over the year (km²).

The combined reading of maps and time series suggests that the largest detected areas in late winter and spring reflect both increased occurrence and, crucially, improved optical visibility, clearer waters, reduced cloud cover and viewing geometries that mitigate sunglint, consistent with previous coastal applications of FDI [5, 6]. Occasional negative FDI episodes observed in midwinter were treated as outliers arising from baseline overshoot under persistent foam and high turbidity.

3.1. Spatial distribution and socio biophysical hotspots

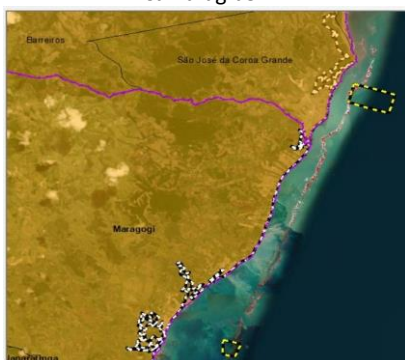
Detections were predominantly concentrated between 1 and 3 km from the shoreline, within the corridor bounded by the beach and the outer reef, with fewer detections very close to the surf zone and beyond the outer reef. This pattern is consistent with near surface convergences produced by wave breaking on the reefs and lagoonal return flow, which accumulate material in narrow bands; with turbidity gradients - clearer water in this corridor enhances FDI detectability compared with the foamy surf zone and very turbid plumes near river mouths; and with human use patterns, as boat routes to natural pools and snorkelling sites generally lie within this 1–3 km band, favouring the introduction and redistribution of floating waste. Recurrent hotspots aligned with reef fronts and with urban river mouths, and spatially overlapped the main tourist towns -Maragogi, São Miguel dos Milagres, Japaratinga and Tamandaré (Figure 6) - supporting the hypothesis of a local anthropogenic contribution, in line with the team's earlier findings for Maceió's urban beaches [7].



(b) Barra de Santo Antônio and Passo de Camaragibe



(a) Maceió and Paripueira



(d) Maragogi and São José da Coroa Grande



(c) São Miguel dos Milagres, Porto de Pedras and Japaratinga



(e) Barreiros and Tamandaré

Figure 6. Images of APACC cities with their respective floating plastic debris in red.

4. DISCUSSION

Taken together, the results indicate that optical detectability windows, reef geometry and seasonal anthropogenic pressure act synergistically. First, reduced turbidity and cloudiness in late winter-spring increase the FDI signal to noise ratio [5, 6]. Second, the near parallel reef system forms semi lagoon environments with fronts and current lines that tend to funnel debris into bands at typical distances of 1-3 km from shore, precisely where detections concentrate. Third, the seasonality of tourism and boat traffic at the most popular destinations coincides with part of the period of higher detectability, amplifying observation [7]. Conversely, the rainy season may increase riverine inputs while simultaneously reducing optical visibility, which helps explain the lower values in the first semester.

While the above inferences are consistent with the literature and the local reef morpho dynamics, important limitations remain. We did not explicitly model rainfall/runoff or winds/currents; we did not incorporate time series of visitor numbers or boat traffic (AIS or local apps); and our metric is detected area, which depends on optical visibility. As next steps, we propose testing cross correlations between monthly detected area and (a) precipitation/river stage, (b) visitation/boat traffic time series and (c) proxies of water clarity, in addition to Lagrangian drift modelling to evaluate hotspot sources and sinks.

5. CONCLUSIONS

FDI applied to Sentinel 2 series, combined with NDVI and FAI, provided a first line of evidence for floating debris occurrence across APACC in 2024, revealing a clear late winter peak and a coast perpendicular structure with maxima in the 1–3 km reef lagoon corridor. The spatial coincidence with major tourist destinations and urban estuaries, together with broader optical windows, offers a plausible explanation for the observed seasonality. We recommend institutionalizing an operational monitoring programme (Sentinel 2 plus Sentinel 1), with field verification and integration of tourism and rainfall/discharge data, so as to separate detectability from actual debris load and support tactical enforcement and clean up.

The results obtained in this study indicate that the method employed proved effective in identifying plastic from the APCC, highlighting its potential as an analytical tool in environmental and monitoring contexts. However, it is important to emphasize that the data presented here are preliminary and represent an initial step in understanding the presence and characterization of these materials. Future studies using complementary approaches will be essential to validate and improve the methodology, as well as to deepen knowledge about the impacts and distribution of plastics in the analyzed region.

Funding: This research was funded by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq Brazil under process 405449/2022-557-4 Project 'Oceans of Plastic: Monitoring the plastic production chain. Integrating disposal and recycling strategies to prevent pollution,' coordinated by Dr. Jessé Marques Pavão.

Acknowledgments: The authors would like to thank the Centro Universitário Cesmac Institution, the Graduate Program in Environmental Systems Analysis (PPGASA), the Plastic Oceans Project (n. 405449/2022-4) and the Laboratory of Emergy and Ecosystem Resilience (LERE).

Conflicts of Interest: The authors declare no competing interests.

REFERENCES

1. Cordova, M. R. Marine plastic debris: distribution, abundance, and impact on our seafood. In *Handbook of Research on Environmental and Human Health Impacts of Plastic Pollution*, IGI Global, 2020, pp. 94-121.
2. Stoll, T., Stoett, P., Vince, J., & Hardesty, B. D. Governance and measures for the prevention of marine debris. *Handbook of Microplastics in the Environment* **2022**, 1129-1151. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39041-9_26
3. Kershaw, P. J. *Marine plastic debris and microplastics - Global lessons and research to inspire action and guide policy change*. 2016.
4. Mugudamani, I., Oke, S. A., & Ikrema, H. Detecting Plastic Pollution in Aquatic Environment Using Remote Sensing Technology: Cost-Saving Method in Pollution and Risk Management for Developing Countries. *Journal of Environmental & Earth Sciences* **2025**, 7(06).
5. Biermann, L., Clewley, D., Martinez Vicente, V., & Topouzelis, K. Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data. *Scientific Reports* **2020**, 10, 5364. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62298-z>
6. Themistocleous, K., Papoutsas, C., Michaelides, S., & Hadjimitsis, D. Investigating detection of floating plastic litter from space using Sentinel 2 imagery. *Remote Sensing* **2020**, 12(16), 2648. <https://doi.org/10.3390/rs12162648>
7. Berto, M. R. S., Reis, M., Lima, T. A. S., Soares, C. N., Silva, I. M. dos S., Cavalcanti, A. S., & Pavão, J. M. Mapping the seasonality of marine debris waste in a tropical touristic hotspot. *Journal of Coastal Conservation* **2025**, 29, 25. <https://doi.org/10.1007/s11852-025-01109-x>
8. Zhu, Z., & Woodcock, C. E. *Object based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery*. Remote Sensing of Environ, 2012.
9. McFeeters, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* **1996**, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
10. Xu, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* **2006**, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
11. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* **2002**, 83, 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
12. Hu, C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment* **2009**, 113(10), 2118-2129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Impacto do Plástico na Saúde Aviária: A importância do diagnóstico por imagem na detecção de corpos estranhos

Maria Clara Araújo¹, Beatriz Dutra¹; Henrique Ramalho¹; Luanna Nobre¹; Rayza Santos¹; Vitoria Sandes²

¹ Discente de Medicina Veterinária do Cesmac; mvetarquivos@gmail.com

² Docente de Medicina Veterinária do Cesmac; vitoria.sandes@cesmac.edu.br

Resumo: A poluição plástica nos oceanos representa um dos maiores desafios ambientais atuais, impactando severamente as aves marinhas, que funcionam como importantes bioindicadoras da saúde dos ecossistemas costeiros e oceânicos. A ingestão de fragmentos plásticos está associada a obstruções gastrointestinais, perfurações, desnutrição e elevada mortalidade. Nesse cenário, a aplicação de exames de diagnóstico por imagem, especialmente a radiografia e a ultrassonografia, tornou-se essencial tanto para o manejo clínico quanto para estratégias de conservação. A radiografia demonstra alta eficácia na detecção de corpos estranhos radiopacos no proventrículo e na moela, possibilitando diagnósticos rápidos e direcionando condutas em centros de reabilitação. Embora limitada na identificação de fragmentos plásticos menos radiopacos, sua associação com a ultrassonografia amplia o alcance diagnóstico. O ultrassom permite visualizar distensões gástricas, retenção de conteúdo não radiopaco e repercussões secundárias em fígado e intestinos, favorecendo a intervenção precoce. Esses recursos têm papel direto no aumento da taxa de sobrevivência dos animais resgatados, pois orientam condutas menos invasivas, reduzem riscos em indivíduos debilitados e permitem monitoramento contínuo. Assim, a integração entre radiografia e ultrassonografia fortalece a prática clínica veterinária e gera informações relevantes para a conservação ambiental, consolidando a imagem diagnóstica como ferramenta estratégica para mitigar os impactos da poluição plástica sobre a fauna marinha.

Palavras-chave: Aves marinhas; Poluição plástica; Radiografia; Ultrassonografia; Conservação.

1. INTRODUÇÃO

A poluição plástica nos ecossistemas marinhos é reconhecida como uma das maiores ameaças ambientais do século XXI, afetando diretamente a biodiversidade e a saúde dos oceanos [1]. Estima-se que milhões de toneladas de resíduos plásticos entrem anualmente no ambiente aquático, resultando em impactos significativos sobre peixes, mamíferos e, especialmente, aves marinhas [2]. As aves são bioindicadores, uma vez que seu comportamento de forrageio e ampla distribuição geográfica permitem avaliar a extensão da contaminação em diferentes regiões costeiras e oceânicas [3]. A ingestão de plásticos está associada a distúrbios gastrointestinais, obstruções, perfurações, perda de condição corporal, angústia respiratória e mortalidade, configurando um grave problema para a conservação da fauna [4]. Nesse cenário, métodos de diagnóstico por imagem, como a radiografia e a ultrassonografia, assumem papel relevante no manejo clínico de indivíduos resgatados e na geração de dados epidemiológicos [5, 9]. Enquanto a radiografia é eficiente para detectar corpos estranhos radiopacos, a ultrassonografia possibilita identificar alterações decorrentes da ingestão de materiais não radiopacos, ampliando a sensibilidade diagnóstica [6]. Assim, este trabalho tem como objetivo revisar a literatura científica acerca dos principais achados radiográficos e ultrassonográficos em aves marinhas com ingestão de plásticos, destacando a importância dessas técnicas tanto para a medicina veterinária quanto para a conservação ambiental.

Este estudo consiste em uma revisão sistemática da literatura científica sobre os achados radiográficos e ultrassonográficos em aves marinhas com ingestão de resíduos plásticos. As bases de dados PubMed, ScienceDirect e Scopus foram consultadas utilizando combinações das palavras-chave: “aves marinhas”, “ingestão de plásticos”, “radiografia”, “ultrassonografia” e “diagnóstico por imagem”.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo consiste em uma revisão sistemática da literatura científica sobre os achados radiográficos e ultrassonográficos em aves marinhas com ingestão de resíduos plásticos. As bases de dados PubMed, ScienceDirect e Scopus foram consultadas utilizando combinações das palavras-chave: “aves marinhas”, “ingestão de plásticos”, “radiografia”, “ultrassonografia” e “diagnóstico por imagem”. Além de órgãos ambientais como o Instituto Biota e páginas científicas e fóruns online.

Foram incluídos artigos publicados em inglês ou português até 2025.

Os critérios de inclusão foram: estudos que relataram achados por imagem em aves marinhas com ingestão confirmada de plásticos, estudos que descreveram o manejo clínico dos indivíduos afetados e publicações que forneceram avaliação quantitativa ou qualitativa dos resultados de imagem. Os critérios de exclusão incluíram estudos focados apenas em outras espécies, relatos sem dados de imagem ou revisões sem achados originais.

A extração de dados foi realizada de forma independente por dois revisores, sendo eventuais divergências resolvidas por consenso. Os dados extraídos incluíram: espécie estudada, tipo e tamanho dos plásticos ingeridos, modalidade de imagem utilizada, principais achados radiográficos e ultrassonográficos, desfechos clínicos e implicações para a conservação.

Não foi necessário obter aprovação ética para esta revisão, uma vez que não foram realizados experimentos com animais vivos. Todos os estudos incluídos cumpriam as normas institucionais e nacionais de bem-estar animal, conforme relatado pelos autores originais.

Sempre que aplicável, referências a conjuntos de dados públicos foram registradas, incluindo números de acesso, garantindo a reprodutibilidade do estudo. Protocolos de imagem já consolidados foram brevemente descritos e devidamente citados, enquanto metodologias novas ou modificadas foram detalhadas para possibilitar sua replicação por outros pesquisadores.

3. RESULTADOS

A revisão sistemática identificou plástico e microplástico em radiografias e ultrassonografias de aves marinhas. Esses achados são cruciais para o diagnóstico e manejo clínico de aves marinhas afetadas pela ingestão de plásticos, contribuindo para a conservação dessas espécies. Os principais achados incluem:

- Radiografia: identificação de corpos estranhos radiopacos no trato gastrointestinal [7] e pulmonar [9] como fragmentos de plásticos e outros detritos
- Ultrassonografia: detecção de alterações no conteúdo gastrointestinal, como distensão, presença de materiais não radiopacos e alterações na motilidade intestinal [7,8].

Figuras



Figura 1. Sacola de lixo rasgada por diversas aves, na Praia da Avenida. Instituto Biota, 2020



Figura 2. Ave envolta em plástico em uma praia da Espanha. National geographic, 2020



Figura 3. Carcaça de ave com plástico em inglúvio, ventrículo e proventrículo. The Uniplanet, 2016



Figura 4. Gaivota é encontrada com anzol no estômago em Mongaguá. Instituto Biopesca, 2019



Figura 5. Radiografia da gaivota. Instituto Biopesca, 2019



Figura 6. Corpo estranho em Ultrassom de frango, 2025

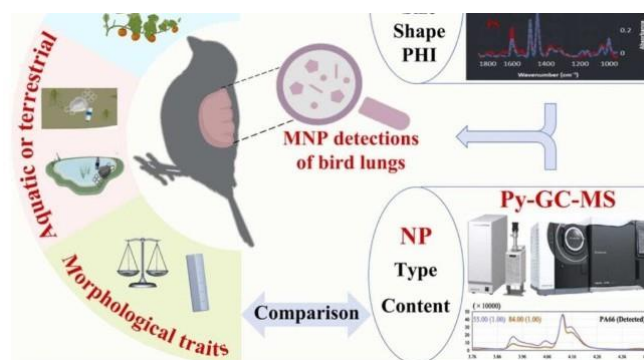


Figura 6. Plásticos e microplásticos encontrados no pulmão de 51 aves marinhas e terrestres. Ciclovivo, 2025

4. DISCUSSÃO

Os achados desta revisão indicam que a ingestão de plásticos por aves marinhas provoca alterações gastrointestinais detectáveis por radiografia e ultrassonografia, mostrando que essas técnicas são complementares para o diagnóstico [7–9]. A radiografia se mostra eficiente na identificação de corpos estranhos radiopacos, enquanto a ultrassonografia aumenta a sensibilidade para materiais não radiopacos, permitindo avaliação funcional e estrutural do trato gastrointestinal. Esses resultados corroboram estudos prévios que ressaltam a importância das aves marinhas como bioindicadores da poluição plástica. Além disso, fornecem subsídios para o manejo clínico e a reabilitação das espécies afetadas, contribuindo para estratégias de conservação. Futuras pesquisas poderiam explorar protocolos padronizados de diagnóstico por imagem, avaliar os efeitos de diferentes tipos e tamanhos de plásticos sobre a fisiologia das aves e investigar a correlação entre ingestão de plásticos e biomarcadores de estresse ou dano orgânico.

5. CONCLUSÃO

Radiografia e ultrassonografia são ferramentas essenciais para o diagnóstico de ingestão de plásticos em aves marinhas, complementando-se na detecção de diferentes tipos de materiais. Além disso, essas técnicas permitem diagnósticos menos invasivos, reduzindo riscos para animais debilitados. Sua aplicação favorece tanto a reabilitação individual quanto a produção de dados científicos essenciais para políticas públicas de conservação. Dessa forma, consolidam-se como ferramentas estratégicas na interface entre clínica, pesquisa e preservação ambiental, reforçando a necessidade de medidas preventivas contra a poluição plástica nos ecossistemas marinhos.

Apêndice A.

Referente a explicação da figura6: MP: microplástico; NP: nanopartículas; Py-GC-MS (Pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massa): método diagnóstico e LDIR (Laser Direct Infrared Imaging): técnica usada para identificar e caracterizar microplásticos em tecidos, incluindo imagens e espectros de absorção.

REFERENCES

1. Matos DV. Aves marinhas como indicadores de poluição por plásticos: exposição aos plásticos em diferentes níveis [dissertação]. Coimbra: Universidade de Coimbra; 2024. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/115159>
2. Valkenburg T. Cagarro reconhecido como bioindicador de poluição marinha por plásticos. SIC Notícias. 2025 Jul 6. Disponível em: <https://sicnoticias.pt/pais/2025-07-06-cagarro-reconhecido-como-bioindicador-de-poluicao-marinha-por-plasticos-04843e0b>
3. Greenfield P. Poluição plástica deixa aves marinhas com danos cerebrais semelhantes ao Alzheimer, mostra estudo. Visão Socioambiental. 2025 Abr 15. Disponível em: <https://visaosocioambiental.com.br/poluicao-plastica-deixa-aves-marinhas-com-danos-cerebrais-semelhantes-ao-alzheimer-mostra-estudo/>
4. Tanaka K, Takada H, Yamashita R, et al. Estudo radiográfico em tartarugas marinhas. Técnicas de diagnóstico por imagem são importantes na avaliação da saúde de quelônios [tese]. Universidade do Algarve; 2012. Disponível em: <https://repositorio.ispa.pt/bitstream/10400.12/4208/1/22671.pdf>
5. Codina-García M, Militão T, Moreno J, González-Solís J. Aves marinhas como bioindicadores de poluição por plásticos [relatório]. ISPA - Instituto Universitário; 2013. Disponível em: <https://repositorio.ispa.pt/bitstream/10400.12/4208/1/22671.pdf>

6. Lavers JL, Bond AL, Hutton I. Plasticosis: Characterising macro- and microplastic-associated fibrosis in seabird tissues. *J Hazard Mater.* 2023;442:130029. doi:10.1016/j.jhazmat.2022.130029
7. Van Hassel L, Lavers JL, Bond AL, et al. Magnetic resonance imaging for non-invasive measurement of plastic ingestion in marine wildlife. *Sci Total Environ.* 2022;808:152773. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.152773
8. Lavers JL, Bond AL, Hutton I. Plastic ingestion by Flesh-footed Shearwaters (*Ardenna carneipes*): Implications for fledgling body condition and the accumulation of plastic-derived chemicals. *Environ Pollut.* 2021;276:116722. doi:10.1016/j.envpol.2021.116722
9. Ciclovivo. Microplásticos são encontrados nos pulmões de aves. Ciclovivo [Internet]. 2023 [citado 2025 set 4]. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/planeta/meio-ambiente/microplasticos-sao-encontrados-nos-pulmoes-de-aves/>
10. Instituto Biopesca. Gaivota é encontrada com anzóis no estômago em Mongaguá. Biopesca [Internet]. 2019 set 2 [citado 2025 set 4]. Disponível em: <https://biopesca.org.br/noticias/gaivota-e-encontrada-com-anzois-no-estomago-em-mongagua/>
11. National Geographic Brasil. Animais, plástico de uso único e os oceanos: o lixo que afeta a vida selvagem. National Geographic Brasil [Internet]. 2018 mai 10 [citado 2025 set 4]. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/2018/05/animais-plastico-uso-unico-oceanos-lixo>

Inovação e Sustentabilidade: Uma proposta de Tecnologias Sociais para Economia Circular em Quilombos Litorâneos

Gildo Feliciano de Castro¹, Mayara Andrade Souza², Jorge Luiz Gonzaga Vieira², Selenobaldo A. C. de Sant'Anna^{2*}

¹ Centro Universitário CESMAC – Programa de Pós-Graduação em Análise de Sistemas Ambientais; gildocastro14@gmail.com

² Centro Universitário CESMAC; masouza@cesmac.edu.br e jorge.vieira@cesmac.edu.br

* Correspondence: selenobaldo.santanna@cesmac.edu.br; Tel.: (21) 972308728

Resumo: Este estudo apresenta uma proposta de integração entre tecnologia social e economia circular e as comunidades tradicionais litorâneas, com foco na Comunidade Quilombola de Santa Luzia do Norte, Alagoas, Brasil. A partir de um diagnóstico ambiental e socioeconômico do território, propõe-se a criação de cadeias produtivas voltadas à reciclagem e reaproveitamento de plásticos, fortalecendo a geração de renda, a inclusão social e a conservação ambiental. O estudo enfatiza a relevância da tecnologia social como instrumento de protagonismo comunitário e uma reação à poluição plástica.

Palavras Chave: Comunidades Tradicionais; Poluição Plástica; Diagnóstico Ambiental.

1. INTRODUÇÃO

A poluição plástica nos oceanos configura-se como uma das principais ameaças à biodiversidade marinha e à segurança alimentar global (1; 2). Em regiões costeiras do Brasil, como o estado de Alagoas, comunidades tradicionais dependem diretamente de ecossistemas costeiros e estuarinos para sua subsistência, sendo, portanto, duplamente impactadas: pela degradação ambiental e pela exclusão econômica.

A Comunidade Quilombola de Santa Luzia do Norte, localizada próxima à Lagoa Mundaú e ao Oceano Atlântico, possui histórico de resistência socio territorial e relações tradicionais de uso dos recursos naturais (3). A ausência de políticas integradas de gestão de resíduos sólidos e a pressão urbana aumentam a vulnerabilidade socioambiental da comunidade.

Nesse contexto, comunidades tradicionais e quilombolas, como a Comunidade Quilombola de Santa Luzia do Norte, Alagoas, vivenciam os efeitos combinados da degradação ambiental e da exclusão socioeconômica. Além da presença de resíduos plásticos trazidos por rios e correntes marinhas, a ausência de políticas públicas eficazes de manejo de resíduos sólidos aumenta a vulnerabilidade desses territórios (4; 5). Estudos apontam que iniciativas de economia circular, integradas a tecnologias sociais e processos participativos, podem reduzir significativamente o impacto da poluição plástica e promover inclusão produtiva (2; 6).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada uma análise documental baseada no Estudo de Capacitação Ambiental (ECA) do Quilombo Santa Luzia do Norte (7), associada a levantamento bibliográfico sobre economia circular (8) e tecnologias sociais aplicadas à gestão de resíduos.

O método adotado envolveu três etapas: (1) Diagnóstico ambiental e socioeconômico; (2) Modelagem da cadeia produtiva; (3) Incorporação de tecnologias sociais.

A etapa do Diagnóstico ambiental e socioeconômico: consiste na coleta e análise de dados sobre as condições ambientais e socioeconômicas da Comunidade Quilombola de Santa Luzia do Norte, Alagoas. A etapa inicial consiste na realização de observações de campo e levantamento de dados secundários sobre a presença de resíduos plásticos nos ecossistemas costeiros e estuarinos, este diagnóstico é importante por servir como base para a definição de prioridades e potencialidades na implementação da economia circular.

A etapa da Modelagem da cadeia produtiva: Com base nos resultados do diagnóstico, apoiam a elaboração de uma modelagem conceitual da cadeia produtiva de reciclagem comunitária. Esta modelagem incluiu etapas de coleta seletiva comunitária, triagem e beneficiamento dos resíduos plásticos, transformação em artefatos reciclados (como utensílios domésticos e insumos para construção civil), além da criação de canais de distribuição e comercialização locais e regionais.

A etapa da Incorporação de tecnologias sociais: tem por caráter perceber a inserção de tecnologias sociais como elemento estruturante da cadeia produtiva. Seguindo as diretrizes do MCTI (4), as tecnologias sociais devem ser entendidas como um conjunto de metodologias participativas e transformadoras que unem saber tradicional, organização comunitária e conhecimento técnico-científico.

3. RESULTADOS

Os resultados observados no Estudo de Capacitação Ambiental (ECA) realizado na comunidade Quilombola de Santa Luzia do Norte revelam um panorama complexo que combina vulnerabilidades socioambientais e potenciais de desenvolvimento sustentável.

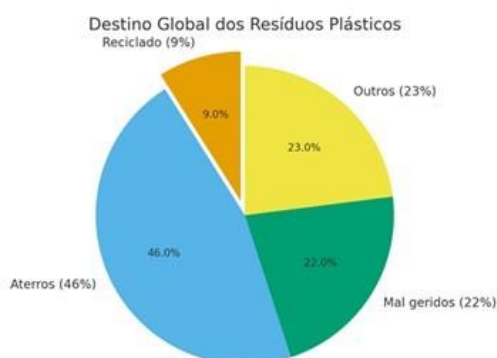
A poluição plástica representa um dos principais desafios ambientais para comunidades costeiras e quilombolas, como Santa Luzia do Norte (AL). No mundo cerca de 400 milhões de toneladas de plástico são produzidas anualmente e apenas 9% são reciclados efetivamente (6)

Os resíduos sólidos de Santa Luzia do Norte são destinados ao aterro sanitário da CTR (Central de Tratamento de Resíduos) de Pilar, que iniciou a operação em 2016, atende aos municípios de Coqueiro Seco, Marechal Deodoro, Pilar, Satuba e Santa Luzia do Norte, e possui uma capacidade de disposição diária de resíduos de 1.000 toneladas. O município de Santa Luzia do Norte contribui com uma taxa de geração per capita de RSU de 0,57 kg/hab/dia e com geração diária de RSU de 3,52 t/dia (10).

Os resultados do Estudo de Capacitação Ambiental (ECA) evidenciam não apenas os desafios socioambientais enfrentados pela comunidade Quilombola de Santa Luzia do Norte, como a poluição plástica e a destinação inadequada de resíduos, mas também indicam oportunidades para o fortalecimento de práticas sustentáveis. A expressiva geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no município, associada à baixa taxa global de reciclagem, ressalta a urgência de soluções inovadoras e integradas.

Nesse contexto, foi possível identificar o potencial estratégico para a criação de cadeias produtivas de reciclagem envolvendo coleta comunitária, triagem, beneficiamento artesanal e produção de insumos para indústrias regionais. As tecnologias sociais propostas pelo MCTI (2025) foram consideradas adequadas para a implementação de soluções locais.

Figura 1 – Destino global dos resíduos plásticos. Fonte: Adaptado de EMBRAPA (6); ONU (5).



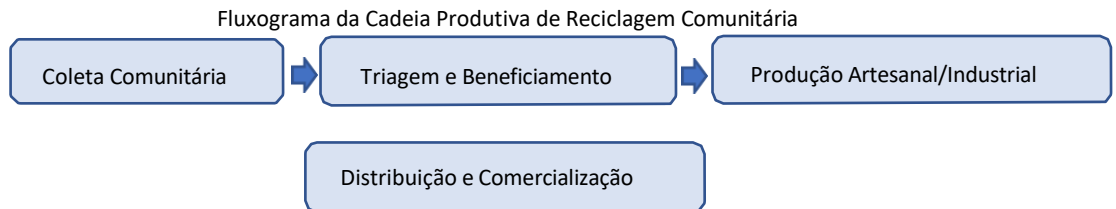
As Experiências exitosas em outras comunidades quilombolas demonstram que a valorização das práticas tradicionais e a promoção de iniciativas de economia solidária podem não apenas gerar renda, mas também fortalecer a identidade cultural e um pouco mais a autonomia da comunidade.

4. DISCUSSÃO

A inserção de comunidades tradicionais em sistemas de economia circular representa não apenas uma estratégia ambiental, mas também um mecanismo de justiça socioambiental (9). No contexto do Quilombo Santa Luzia do Norte, a tecnologia social atua como ponte entre o conhecimento tradicional e as demandas contemporâneas de gestão de resíduos.

Os dados reforçam a necessidade de uma economia circular que priorize a redução, reutilização e reciclagem de plásticos, conforme relatórios recentes da ONU (5). A inclusão produtiva de comunidades tradicionais, por meio de tecnologias sociais, é uma estratégia essencial para o enfrentamento da poluição plástica oceânica, gerando renda local e fortalecendo a gestão comunitária.

Figura 2 – Fluxograma conceitual da cadeia produtiva de reciclagem comunitária. Fonte: Elaborado pelos autores (2025).



A adoção de cadeias produtivas comunitárias pode subsidiar políticas públicas alinhadas à Agenda 2030 (ODS 12 e ODS 14), incluindo: (1) incentivos fiscais para indústrias que utilizem materiais reciclados; (2) integração com programas de logística reversa; (3) capacitação técnica e social em comunidades costeiras; (4) fortalecimento da governança local.

5. CONCLUSÕES

A criação de cadeias produtivas para reciclagem de plásticos em quilombos litorâneos, com base na economia circular e em tecnologias sociais, apresenta-se como solução estratégica para enfrentamento da poluição plástica oceânica. No caso do Quilombo Santa Luzia do Norte, a implementação desse modelo pode gerar benefícios ambientais, sociais e econômicos, promovendo resiliência comunitária e contribuindo para os objetivos do II Workshop Internacional sobre a Poluição Plástica nos Oceanos.

REFERÊNCIAS

- 1 PNUMA - PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. Relatório da ONU sobre poluição plástica alerta sobre falsas soluções e confirma necessidade de ação global urgente. Nairobi: PNUMA, 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/relatorio-da-onu-sobre-poluicao-plastica-alerta-sobre>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- 2 OCEANA. Fragmentos da destruição: impactos do plástico na biodiversidade marinha brasileira. Brasília: Oceana, 2024. DOI: 10.5281/zenodo.13931989. Disponível em: <http://brasil.oceana.org>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- 3 CODEVASF. Espaços de convivência em Alagoas recebem investimentos da Codevasf. 08 nov. 2024. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/noticias/2024/espacos-de-convivencia-e-comercio-popular-em-santa-luzia-do-norte-al-recebem-investimentos-da-co>. Acesso em: 27 ago. 2025
- 4 MCTI. Tecnologia Social: conceitos e aplicações. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2025.
- 5 ONU. Relatório sobre poluição plástica alerta sobre falsas soluções e necessidade de ação global urgente. Nações Unidas, 2024.
- 6 EMBRAPA. Poluição por plástico: um desafio global. Brasília: EMBRAPA, 2024.
- 7 CASTRO, Gildo Feliciano de. Relações Ambientais e Territoriais no Quilombo Santa Luzia do Norte-AL: Um Estudo de Capacitação Ambiental. Dissertação (Mestrado Profissional em Análise de Sistemas Ambientais) – CESMAC, Maceió, 2025.
- 8 BRASIL. Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais. Brasília: MMA, 2017
- 9 MAINARDI, Fernando Henrique Barros et al. A economia circular como estratégia para o desenvolvimento sustentável no Brasil. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, São Paulo, v. 11, n. 6, p. 3127-3142, jun. 2025. DOI: 10.51891/rease.v11i6.19876.
- 10 SANTOS, M. A. P. Implementação de um plano de gestão de resíduos eletroeletrônicos para cidades de pequeno porte: uma pesquisa-ação em Santa Luzia do Norte- AL/Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Instituto Federal de Alagoas, Campus Marechal Deodoro, Marechal Deodoro, 2021.

Integração de soluções baseadas na natureza em ambientes litorâneos: estratégias para controle do escoamento em áreas em processo de urbanização

Fernando Silva de Carvalho ¹ e Carlos Alberto Inacio da Silva ²

¹ Centro Universitário CESMAC; fernando.carvalho@cesmac.edu.br

² calberto.eng07@gmail.com

* Correspondence: Fernando.carvalho@cesmac.edu.br; Tel.: (82)99119-5942

Resumo: Este estudo avalia a eficácia de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) na gestão de águas pluviais em um novo loteamento na região litorânea de Alagoas, caracterizada por solos arenosos e alta vulnerabilidade hídrica. Foram analisados três cenários: natural ($C = 0,25$), urbanizado ($C = 0,9$) e com SbN ($C = 0,6$), que combina pavimentos permeáveis e sistema de retenção subterrâneo em tubos de polietileno de alta densidade (PEAD). A vazão de pico foi estimada pelo Método Racional, resultando em $1,827 \text{ m}^3/\text{s}$ (natural), $6,579 \text{ m}^3/\text{s}$ (urbanizado) e $5,118 \text{ m}^3/\text{s}$ (com SbN), indicando uma redução de 22% com a adoção das SbN. A análise dos hidrogramas mostra que o sistema com SbN atenua o pico e alonga o tempo de resposta, promovendo maior retenção e infiltração. Os resultados demonstram que a integração de soluções técnicas e naturais é eficaz para reduzir o impacto da urbanização, contribuindo para o desenvolvimento de cidades mais resilientes e sustentáveis.

Palavras-chave: Soluções Baseadas na Natureza; retenção de águas pluviais; áreas litorâneas.

1. INTRODUÇÃO

A expansão urbana em áreas litorâneas intensifica o escoamento superficial devido à impermeabilização do solo, aumentando a frequência de alagamentos e a degradação ambiental. Em regiões como o litoral de Alagoas, onde predominam solos arenosos e vegetação nativa de coqueiros, a alta permeabilidade natural é frequentemente comprometida por loteamentos convencionais que ignoram funções hidrológicas e ecossistêmicas. Nesse cenário, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) emergem como estratégias eficazes para restaurar a infiltração, reduzir picos de vazão e promover serviços ecossistêmicos essenciais, como regulação climática, controle de escoamento e qualidade do ar [1].

As SbN são definidas como ações inspiradas ou apoiadas na natureza, que buscam solucionar problemas ambientais e urbanos de forma sustentável, integrando benefícios ecológicos, sociais e econômicos [1]. No Brasil, seu uso tem ganhado destaque em projetos de drenagem urbana, especialmente em contextos de alta vulnerabilidade hídrica [2]. Este estudo avalia a implantação de SbN — como pavimentos permeáveis, bacias de infiltração e preservação de vegetação nativa — em um novo loteamento na região litorânea de Alagoas, com o objetivo geral de analisar sua eficácia na mitigação do escoamento superficial. Especificamente, busca-se identificar técnicas compensatórias aplicáveis em zonas litorâneas, estimar as vazões de pico em diferentes cenários de uso do solo e avaliar o impacto da adoção dessas soluções.

A justificativa baseia-se na urgência de integrar planejamento urbano e serviços ecossistêmicos, conforme destacado por Kaam e Gallardo [2], que demonstram como as SbN geram benefícios múltiplos em projetos de revitalização urbana. Ao focar em áreas com alta vulnerabilidade hídrica, este trabalho contribui para o desenvolvimento de cidades mais resilientes e sustentáveis no Nordeste brasileiro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo busca avaliar as vantagens de projetos desenvolvidos sob os conceitos de SbN, agregando valor à saúde e ao bem-estar no planejamento urbano. O principal foco foi avaliar a redução do escoamento superficial em um novo loteamento na região litorânea de Alagoas, caracterizada por solos arenosos e vegetação predominante de coqueiros. A metodologia foi estruturada em três etapas principais: A metodologia foi estruturada em três etapas: (1) revisão bibliográfica e caracterização da área de estudo, (2) definição de cenários hidrológicos e estimativa de vazões de pico pelo Método Racional, e (3) simulação de hidrogramas por convolução com funções gaussianas para análise comparativa.

Inicialmente, realizou-se uma revisão teórica sobre SbN, com ênfase em estratégias de drenagem sustentável, como pavimentos permeáveis e bacias de retenção e infiltração. A solução proposta combina pavimentos permeáveis — que permitem a infiltração direta da água da chuva — com um sistema de retenção subterrâneo em tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) [Figura 01].

Figura 1. Ilustração do Sistema proposto.



Esse sistema atua como reservatório de retenção, armazenando temporariamente o escoamento excedente e liberando-o de forma controlada, reduzindo o pico da vazão a jusante. Esta solução foi selecionada por sua adequação a solos com alta permeabilidade, baixa profundidade do lençol freático e necessidade de soluções subterrâneas que não ocupem espaço superficial — fatores críticos em áreas litorâneas urbanizadas.

Desta feita, foram analisados três cenários com diferentes coeficientes de escoamento (C):

(i) cenário atual ($C = 0,25$), representando a condição natural com vegetação nativa; (ii) cenário urbanizado ($C = 0,9$), simulando impermeabilização total sem controle de drenagem; e (iii) cenário com SbN ($C = 0,6$), que incorpora pavimentos permeáveis e o sistema de retenção em PEAD. A vazão de pico foi estimada pelo Método Racional:

$$Q = C \cdot i \cdot A$$

Onde:

Q é a vazão de pico (m^3/s),

C é o coeficiente de escoamento,

i é a intensidade pluviométrica (166,07 mm/h) e A é a área de drenagem (4,4 ha).

A partir dos valores obtidos, foram gerados hidrogramas sintéticos e os parâmetros de tempo de pico e dispersão foram ajustados conforme o cenário, refletindo tempos de resposta mais curtos em áreas urbanizadas e mais longos nas com SbN.

Por fim, os hidrogramas foram gerados e comparados para análise qualitativa e quantitativa do comportamento do escoamento superficial. A comparação permitiu avaliar a eficácia das SbN na redução da vazão de pico e no alargamento do tempo de resposta, indicadores-chave para a mitigação de alagamentos e a promoção de um desenvolvimento urbano resiliente em áreas litorâneas vulneráveis.

3. RESULTADOS

O estudo foi realizado com base em dados de um projeto de drenagem de um novo loteamento localizado na região do litoral norte de Alagoas, conforme supracitado, trata-se de uma área marcada por solos predominantemente arenosos, vegetação de coqueiros e alta permeabilidade natural. Foram realizados três ensaios de percolação para avaliar a capacidade de infiltração do solo. Os resultados apontaram taxas entre 53 e 65 L/m².dia, com valores específicos de 65 L/m².dia, 53 L/m².dia e 65 L/m².dia.

Com base nessa caracterização, foi desenvolvido um sistema integrado de retenção e detenção subterrânea, composto por tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) DN 1000 mm, dispostos em valas paralelas. O sistema foi projetado para atuar como um reservatório de retardo, permitindo que parte da água se infiltre no solo e o excedente seja liberado de forma controlada, evitando altas vazões e erosões no ponto de deságue. A memória de cálculo indicou a construção de 5 valas com 15,00 m de comprimento cada, totalizando 75,00 m lineares de tubulação, com um volume útil de armazenamento de 66,75 m³.

Figura 2. Planta esquemática do sistema de tubos PEAD e reservatórios de detenção.



Além disso, foram implantados dois reservatórios finais no lado direito do empreendimento, com dimensões de 7,25 m de comprimento, 1,2 m de largura e altura útil de 0,7 m, resultando em um volume adicional de 12,18 m³. Assim, o volume total de detenção/retenção calculado foi de 102,18 m³, suficiente para armazenar o escoamento gerado em eventos pluviométricos de projeto. O excesso, quando houver, é direcionado de forma controlada para o deságue na praia, conforme exigido pela legislação local.

A avaliação hidrológica foi feita com base no Método Racional, considerando uma intensidade pluviométrica de 166,07 mm/h e uma área de drenagem de 4,4 hectares. Os cenários analisados foram: natural ($C = 0,25$), urbanizado ($C = 0,9$) e com Soluções Baseadas na Natureza ($C = 0,6$). Os resultados mostraram que, no cenário natural, a vazão de pico foi de 1,827 m³/s, refletindo a eficiência do solo arenoso e da cobertura vegetal na infiltração e no retardo do escoamento.

Já no cenário urbanizado — com 90% de impermeabilização — a vazão de pico atingiu 6,579 m³/s, um aumento de cerca de 260% em relação ao cenário natural.

Quando foram aplicadas as SbN propostas, que integra pavimentos permeáveis e sistema de detenção em PEAD, apresentou uma vazão de pico de 5,118 m³/s — uma redução de 22% frente ao cenário urbanizado.

A comparação entre os hidrogramas (Figura 3) indica que o cenário urbanizado exibe um pico acentuado e de curta duração, típico de áreas seladas. Já o cenário com SbN apresenta um hidrograma mais alargado, com pico atenuado e tempo de ascensão maior, indicando maior retenção e infiltração. O cenário natural, por sua vez, mostra o comportamento mais equilibrado, com vazão distribuída ao longo do tempo.

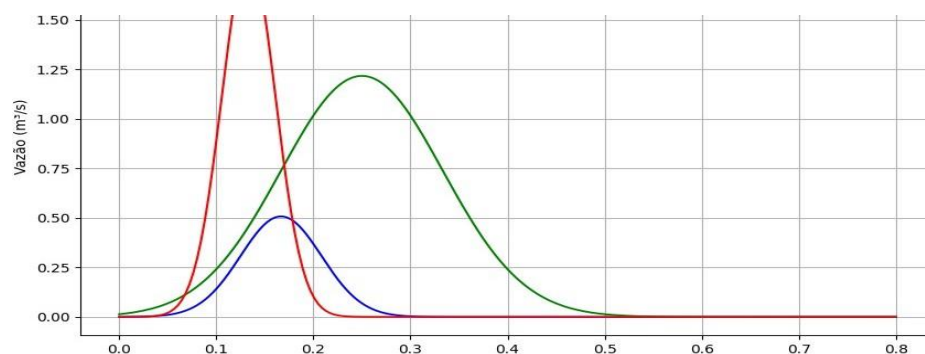


Figura 3. Hidrogramas comparativos dos três cenários (atual, urbanizado e com SbN)]

4. DISCUSSÃO

Verificou-se que sistemas integrados combinando pavimentos permeáveis e reservatórios em tubos de PEAD podem reduzir em 22% a vazão de pico em áreas com solos alta capacidade de absorção. Além disso, a solução atua como reservatório subterrâneo sem ocupar espaço superficial, alinhando-se às melhores práticas de gestão hídrica.

A análise dos hidrogramas reforça que o cenário com SbN não apenas reduz o pico de vazão, mas também alonga o tempo de resposta da bacia, transformando um escoamento rápido e concentrado em um fluxo mais controlado. Esse comportamento é essencial para a resiliência urbana, especialmente em regiões vulneráveis a eventos pluviométricos intensos, cuja frequência tem aumentado com as mudanças climáticas.

Os resultados mostram não apenas redução do pico de vazão, mas também maior tempo de resposta da bacia, crucial para enfrentar eventos extremos. Com a preservação da vegetação nativa (como coqueirais) pode-se agregar benefícios adicionais: regulação climática, sequestro de carbono e valor paisagístico.

Esses resultados indicam que, mesmo em áreas com alta taxa de urbanização, a adoção de soluções integradas — como a combinação de pavimentos permeáveis e reservatórios subterrâneos em PEAD — pode promover ganhos significativos em termos de resiliência hídrica, especialmente quando alinhadas às características naturais do solo e da vegetação local.

5. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que a integração de Soluções Baseadas na Natureza (SbN), como pavimentos permeáveis e sistemas de retenção subterrânea em tubos de PEAD, é uma estratégia eficaz para mitigar os impactos do escoamento superficial em áreas litorâneas urbanizadas. A combinação dessas soluções potencializa os benefícios hidrológicos e ecológicos, promovendo uma gestão mais sustentável das águas pluviais.

As SbN não apenas atenuam picos de vazão e regulam o comportamento do escoamento, mas também oferecem serviços ecossistêmicos essenciais, como regulação climática, melhoria da qualidade do ar e valorização da paisagem local. Sua aplicação em solos arenosos, comuns no litoral de Alagoas, mostra-se tecnicamente viável e ambientalmente benéfica.

O sucesso do sistema depende de dimensionamento adequado e manutenção regular - limpeza dos tubos e controle de sedimentos são essenciais. Apesar de não ser obrigatória em Alagoas, essa abordagem mostra-se estratégica para prevenir alagamentos e proteger ecossistemas costeiros, oferecendo um modelo sustentável para desenvolvimento urbano em áreas litorâneas sensíveis.

REFERENCIAS

1. OLIVEIRA, R. A. et al. *SBN's, o que são?* Programa de Iniciação Científica Jr., Instituto Federal de Alagoas – Campus Marechal Deodoro, 2024. 27 f.
2. KAAM, E. N.; GALLARDO, A. L. C. F. Nature-Based Solutions in urban brownfield regeneration projects: new paradigms for urban problems. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 37, n. 109, p. 303–313, 2023. <https://doi.org/10.1590/S0103-4014.2023.37109.018>.
3. MOURA, J. P.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Soluções Baseadas na Natureza para Gestão de Águas Pluviais em Áreas Urbanas. *Movimento de Meio Ambiente e Tecnologia*, Brasília, v. 7, n. 3, p. 1–15, 2021. Disponível em: <https://mpmt.mp.br/site/storage/webdisco/arquivos/189419-Texto%20do%20artigo-532177-1-10-20211215.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2025.
4. FRAGA, G. R. Soluções baseadas na Natureza: elementos para a tradução do conceito às políticas públicas brasileiras. Tese de Doutorado — Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2020. 247 f.

-
5. ALMEIDA, R. H.; FERREIRA, D. F. Bacias de retenção como solução sustentável para drenagem urbana em pequenas bacias: análise hidrológica e benefícios ambientais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 27, e44, p. 1–15, 2022. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.27222200044>

IPTU Verde e Gestão Costeira: Potencial para a Redução da Poluição Marinha nas Cidades Litorâneas Brasileiras

Bruno Tenório Navarro Manta¹, Mayco Sullivan Araújo de Santana², Selenobaldo A. C. de Sant'Anna^{2*}

¹ Centro Universitário CESMAC – Programa de Pós-Graduação em Análise de Sistemas Ambientais; smttnavaro850@gmail.com

² Centro Universitário CESMAC; mayco.santana@cesmac.edu.br

* Correspondente: selenobaldo.santanna@cesmac.edu.br.; Tel.: (21) 972308728

Resumo:

O presente estudo analisa o IPTU Verde como instrumento fiscal voltado à promoção de práticas sustentáveis em cidades litorâneas brasileiras, com foco na redução da poluição marinha. Esse mecanismo extrafiscal concede descontos tributários a imóveis que adotam medidas ambientais, como telhados verdes, arborização urbana, captação de água da chuva e coleta seletiva, incentivando comportamentos responsáveis e alinhando políticas urbanas à conservação de ecossistemas costeiros. Legalmente, sua aplicação encontra respaldo na Constituição Federal, no Código Tributário Nacional e no Estatuto da Cidade, permitindo que os municípios integrem políticas fiscais à função social da propriedade e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. A metodologia abrange uma revisão integrativa com base em publicações acadêmicas, relatórios oficiais e legislações municipais (2010-2025), com buscas em bases como SciELO, Scopus e Google Scholar, usando termos como IPTU Verde, gestão costeira e lixo no mar. Os achados indicam que o IPTU Verde pode (i) estimular infraestrutura verde e coleta seletiva; (ii) reduzir o aporte urbano de resíduos ao mar; (iii) gerar valorização de imóveis tornando-os sustentáveis; e (iv) requerer regulamentação específica e articulação intersetorial. Conclui-se que o IPTU Verde consiste em um instrumento promissor de gestão costeira, recomendando-se ainda estudos sobre sua efetividade e integração com educação ambiental.

Palavras Chave: Instrumento Fiscal; Sustentabilidade Urbana; Ecossistemas Costeiros; Lixo no Mar

1. INTRODUÇÃO

A crescente poluição marinha, agravada pelo aporte de resíduos sólidos urbanos e efluentes nas zonas costeiras, tem exigido novas estratégias de gestão ambiental que integrem desenvolvimento urbano e conservação dos ecossistemas marinhos. Nesse contexto, o Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) Verde emerge como um instrumento fiscal inovador, cuja função extrafiscal busca incentivar práticas sustentáveis nos imóveis urbanos, concedendo descontos tributários para aqueles que adotam medidas que reduzem impactos ambientais (1; 2).

A aplicação do IPTU Verde tem respaldo jurídico na Constituição Federal (art. 156, I) (3), no Código Tributário Nacional (arts. 32 a 34) (4) e no Estatuto da Cidade (Lei nº 10.257/2001) (5), possibilitando que os municípios, no exercício de sua competência tributária, alinhem políticas fiscais à função social da propriedade e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Experiências recentes em cidades como Salvador, Florianópolis, Natal e Curitiba demonstram que este instrumento pode induzir comportamentos ambientalmente responsáveis, como a implementação de telhados verdes, sistemas de captação de água da chuva, arborização urbana e coleta seletiva.

Para cidades litorâneas brasileiras, a adoção do IPTU Verde representa uma oportunidade estratégica de integrar a gestão costeira ao Plano Nacional de Combate ao Lixo no Mar (PNCLM), reduzindo a carga poluidora que chega aos ecossistemas marinhos e fortalecendo a economia azul. Ao mesmo tempo, promove a valorização de imóveis que incorporam tecnologias limpas e amplia a conscientização social sobre a importância da preservação marinha e das áreas estuarinas.

Entretanto, a efetividade deste instrumento depende de regulamentações específicas, sistemas de monitoramento e integração com políticas urbanísticas e de saneamento básico, de modo a garantir que a renúncia fiscal resulte em ganhos ambientais mensuráveis e duradouros.

A urgência em alinhar os mecanismos de tributação municipal a estratégias eficazes de mitigação da poluição costeira, uma vez que os oceanos recebem diariamente grande volume de resíduos provenientes do escoamento urbano e da deficiência histórica de saneamento básico. Instrumentos como o IPTU Verde têm potencial não apenas de induzir boas práticas ambientais individuais, mas também de estimular um ciclo virtuoso de governança ambiental, articulando o poder público, o setor privado e a sociedade civil.

Além disso, a carência de análises integradas que relacionem políticas fiscais inovadoras e gestão costeira sustentável evidencia uma lacuna científica e de boas práticas. O presente trabalho busca propor uma reflexão sobre o uso do IPTU Verde como ferramenta de apoio de contrapartida financeira às políticas de proteção marinha, destacando sua viabilidade jurídica, impactos potenciais e desafios de implementação, regulamentação, bem como a posterior fiscalização em um contexto em que a degradação costeira ameaça não apenas os ecossistemas, mas também a economia e a saúde pública das populações litorâneas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente revisão integrativa será conduzida com o objetivo de analisar a contribuição do IPTU Verde para a gestão costeira e a redução da poluição marinha nas cidades litorâneas brasileiras. Inicialmente, será formulada a questão norteadora: Qual a contribuição do IPTU Verde para a gestão costeira e redução da poluição marinha nas cidades litorâneas brasileiras?

Serão definidos critérios de inclusão que contemplarão artigos científicos, relatórios técnicos, legislações e documentos oficiais publicados no período de 2010 a 2025, nos idiomas português e inglês. Como critérios de exclusão, serão desconsiderados estudos sem relação direta com políticas fiscais ambientais, publicações duplicadas e documentos sem acesso ao texto completo.

A busca bibliográfica será realizada nas bases SciELO, Scopus e Google Scholar, utilizando os termos "IPTU Verde", "gestão costeira", "lixo no mar", "IPTU ecológico" e "tributação ambiental", aplicando operadores booleanos e filtros temporais.

A seleção dos documentos ocorrerá em duas etapas: a primeira consistirá na leitura de títulos e resumos para triagem inicial; a segunda envolverá a leitura integral dos materiais selecionados, e o processo será registrado em um fluxograma conforme as diretrizes do modelo PRISMA.

Os dados serão extraídos de forma sistematizada, incluindo ano de publicação, local do estudo, tipo de documento, principais resultados e indicadores relacionados ao IPTU Verde e sua aplicação na gestão costeira. A análise crítica será organizada em cinco eixos temáticos: poluição marinha; políticas públicas de gestão costeira; IPTU Verde como instrumento econômico; contribuição do IPTU Verde para o combate ao lixo no mar; e perspectivas e recomendações.

Por fim, a discussão dos resultados integrará as evidências obtidas às diretrizes do Plano Nacional de Combate ao Lixo no Mar (PNCLM) e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 14), permitindo identificar padrões, lacunas e oportunidades para a adoção do IPTU Verde como estratégia fiscal de mitigação da poluição marinha em cidades litorâneas.

3. RESULTADOS

Espera-se que o IPTU Verde atue como um mecanismo de estimulação de práticas sustentáveis nas cidades litorâneas brasileiras, com efeitos positivos no meio ambiente e na qualidade de vida urbana. Segundo Accioly e Brito (6), “os incentivos tributários, como o IPTU Verde, constituem instrumentos econômicos capazes de conduzir intervenções de particulares rumo ao bem coletivo, estimulando o uso racional de recursos naturais e a conservação ambiental”.

As experiências municipais já implementadas reforçam esse potencial. Em Curitiba, por exemplo, dados de 2012 apontam que cerca de 19,7% dos imóveis receberam desconto via IPTU Verde, contribuindo diretamente para a ampliação da arborização urbana e da permeabilidade do solo, fatores que reduzem enchentes e melhoram a qualidade ambiental (7). Conforme destaca o relatório municipal, “a adoção do IPTU Verde tem se mostrado um fator de incentivo à incorporação de soluções sustentáveis no ambiente construído, com reflexos positivos para a drenagem urbana e a mitigação de resíduos sólidos” (7).

Em Feira de Santana (BA), estudo recente evidenciou que “a política de extrafiscalidade do IPTU Verde, ao conceder redução tributária em troca de práticas ambientais, promoveu mudanças significativas no comportamento dos contribuintes, ampliando a coleta seletiva e o manejo adequado de resíduos” (8).

Além dos benefícios ambientais diretos, autores ressaltam o impacto social e econômico. De acordo com Accioly e Brito (6), “a percepção de que o imóvel sustentável agrega valor de mercado e gera economia tributária cria um ciclo virtuoso de investimento privado alinhado ao interesse público”. Isso se alinha às metas do Plano Nacional de Combate ao Lixo no Mar (PNCLM) e do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14 (Vida na Água), promovendo maior engajamento de cidadãos e empresas na proteção costeira.

Contudo, desafios permanecem. Conforme aponta Antunes et al. (2), “a ausência de monitoramento dos resultados ambientais do IPTU Verde em muitos municípios brasileiros compromete a mensuração efetiva de sua contribuição para a redução da poluição costeira”. Assim, é esperado que sua adoção em cidades litorâneas venha acompanhada de regulamentações mais robustas, indicadores de desempenho ambiental e mecanismos de transparência fiscal.

5. CONCLUSÕES

O IPTU Verde apresenta-se como um instrumento fiscal promissor para integrar políticas urbanas e ambientais nas cidades litorâneas, contribuindo para a redução da poluição marinha. As experiências analisadas (Curitiba, Salvador, Feira de Santana) demonstram que incentivos fiscais podem estimular práticas sustentáveis.

Além de gerar benefícios ambientais diretos, o IPTU Verde promove a valorização de imóveis sustentáveis e maior conscientização da sociedade sobre a importância da preservação costeira. No entanto, a efetividade do instrumento ainda enfrenta desafios, como a baixa adesão municipal, ausência de indicadores de monitoramento e falta de integração com políticas estruturantes de saneamento e gestão costeira.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, P. P. S.; BONFIM, M. P. O IPTU verde: uma estratégia de desenvolvimento sustentável para a cidade de Volta Redonda. R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 9, n. 4, p. 864-883, out/dez. 2020
- 2 ANTUNES, N. Z.; GUERINO, A. C.; IENSEN, S. F.; GOULART, A. R. G. O municipal como instrumento de política pública de incentivo à sustentabilidade. II Congresso Internacional e IV Seminário Nacional de Desenvolvimento regional Conflitos Globais e suas repercussões no território dias 17 e 18 de agosto de 2023
- 3 BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília: Presidência da República 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm. Acesso em: 02 set. 2025.
- 4 BRASIL. Lei nº 5172 de 25 de outubro de 1966. Dispõe sobre o Sistema Tributário Nacional e institui normas gerais de direito tributário aplicáveis à União, Estados e Municípios. Brasília: Presidência da República. 1966. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l5172compilado.htm. Acesso em: 02 set. 2025.
- 5 BRASIL. Lei 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Brasília: Presidência da República. [2001]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm. Acesso em: 02 set. 2025.
- 6 ACCIOLY, T.; BRITO, L. Instrumentos fiscais ambientais e a sustentabilidade urbana: uma análise do IPTU Verde no Brasil. Revista Engenharia Urbana e Debate, v. 12, n. 2, p. 10-20, 2022.
- 7 CURITIBA. Lei 14.771, de 17 de dezembro de 2015. Dispõe sobre a revisão do plano diretor de Curitiba de acordo com o disposto no art. 40, § 3º, do estatuto da cidade, para orientação e controle do desenvolvimento integrado do município. Curitiba: Câmara Municipal de Curitiba. [2015]. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.leg.br/atividade-parlamentar/legislacao>. Acesso em: 02 set. 2025.
- 8 SANTANA, J.; LIMA, F. Política de extrafiscalidade e IPTU Verde em Feira de Santana: resultados e perspectivas. Revista Gestão Ambiental Contemporânea, v. 9, n. 1, p. 22-35, 2023.

Microplastics in Urban River Sediments: Implications for Water Management and Continental Input to the Oceans

Marcella Araújo Macêdo ^{1,*}, Sabrina Duarte Alencar², Gabriella Braga Feitosa², Jorge Marcell Coelho Menezes³ and Francisco José de Paula Filho ⁴

¹ Master's student in the Postgraduate Program in Sustainable Regional Development (PRODER) – Federal University of Cariri (UFCA); marcella.macedo@aluno.ufca.edu.br

² Undergraduate in Materials Engineering - Federal University of Cariri (UFCA); sabrina.alencar@aluno.ufca.edu.br; braga.gabriella@aluno.ufca.edu.br

³ Laboratory Technician at the Analytical Laboratory – Federal University of Cariri (UFCA); jorge.menezes@ufca.edu.br

⁴ Permanent Professor of the Graduate Program in Sustainable Regional Development (PRODER) – Universidade Federal do Cariri (UFCA)(Advisor); francisco.filho@ufca.edu.br

* Correspondence: marcella.macedo@aluno.ufca.edu.br; Tel.: (88) 996328024

Abstract: Rivers are among the main pathways for plastic pollution entering the oceans. In this context, this study analyzed the occurrence and characteristics of microplastics in river sediments from urban micro-basins in the Cariri Metropolitan Region, Ceará, semi-arid region in northeastern Brazil, considering their relationship with environmental factors. Samples were collected at twelve strategic points and subjected to physical-chemical analysis, quantification, and morphological characterization using a stereomicroscope. Concentrations ranged from 300 to 16,700 particles per kilogram of dry sediment, with a predominance of fragments, films, and fibers, indicating domestic and urban sources. Statistical analysis revealed a positive correlation between the amount of microplastics and the organic matter content, as well as the influence of parameters such as pH and temperature. The results reinforce that urbanized areas are critical points of entry for microplastics into aquatic systems due to improper waste disposal and lack of effluent treatment. The research highlights the importance of public policies aimed at controlling pollution at the source as a way to reduce the flow of plastics into marine ecosystems and protect inland water bodies.

Keywords: Microplastic; Sediments; River; Ocean.

1. INTRODUCTION

Plastic pollution is widely recognized as a global environmental challenge. Its magnitude and volume threaten the health of water bodies, especially oceans and seas [1]. About 80% of plastic debris is transported to the sea via rivers, which act as conduits for this material to the ocean [2]. Among the various forms of plastic contaminants, microplastics (1.0 μm to 5.0 mm) are of particular concern due to their persistence [3], bioavailability [4], and ability to adsorb toxic substances [4-8].

The dynamics of microplastic transport are closely linked to watershed characteristics, urbanization, land use, and water management practices [6-7]. Improper solid waste management and stormwater runoff exacerbate the release and redistribution of plastic debris, especially during high-flow events [7]. Consequently, understanding the behavior of microplastics in river environments is essential for both the conservation of freshwater ecosystems and marine protection.

This study aimed to characterize and quantify microplastic contamination in river sediments, assess their patterns and distribution, and discuss the control of plastic pollution in the continent-ocean continuum.

2. MATERIALS AND METHODS

Sediment samples were collected from twelve points along the flow of urban and peri-urban rivers within three microbasins of the Cariri Metropolitan Region (RMC), south of the state of Ceará, semi-arid region of the Brazilian Northeast. Sampling points included locations

near river sources with low population density, as well as sites within urban centers. The sampling locations are shown in Figure 1.

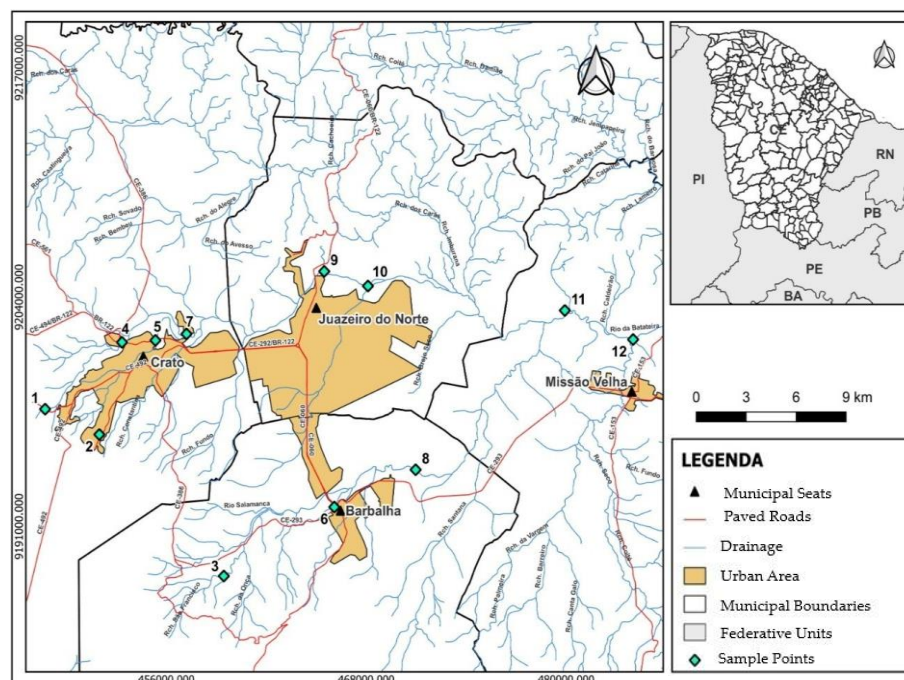


Figure 1. Sampling points.

The sampling campaign was conducted in July 2024, at the beginning of the dry season in the region. A stainless-steel Ekman dredge was used to collect bed sediments. Samples were stored in 1.0-liter glass jars.

To characterize the sediment samples, temperature and pH measurements were taken on site. In the laboratory, physical characterization was performed using the gravimetric method to evaluate the percentage of solids in the samples [8].

The sample preparation methodology was adapted from the authors in [9–10], as no standardized protocol exists. Therefore, the methodologies found in the literature were adapted in order to achieve a better preparation result.

In the laboratory, samples were dried in a sand bath at 70 °C until a constant weight was achieved. After drying, they were macerated with a mortar and pestle and sieved through a 5.00 mm mesh. Subsamples of 40.0000 g were weighed in duplicate on an analytical balance. For weighing, the samples were homogenized and quartered to ensure representative coverage of the entire sample volume. Organic matter was digested by adding 20 mL of 35% hydrogen peroxide and 20 mL of a catalyst solution (FeSO_4). This step was repeated until the reaction between the organic matter and the peroxide ceased. Samples were pre-dried between digestion processes, with a 24-hour interval between each step.

Density separation was performed using a zinc chloride saline solution with a density of 1.5 g/cm³. The previously dried samples were immersed in the solution, homogenized, and transferred to a 250 mL graduated cylinder, where they were left to settle for 24 hours. After this period, the supernatant was filtered using a glass filtration system and a 0.45 µm Whatman GF/A glass fiber filter membrane. Visual identification and counting of microparticles were performed with an ECZ-BLACK trinocular stereomicroscope following the methodology described in [11]. Figure 2 illustrates the methodology used for sample preparation.

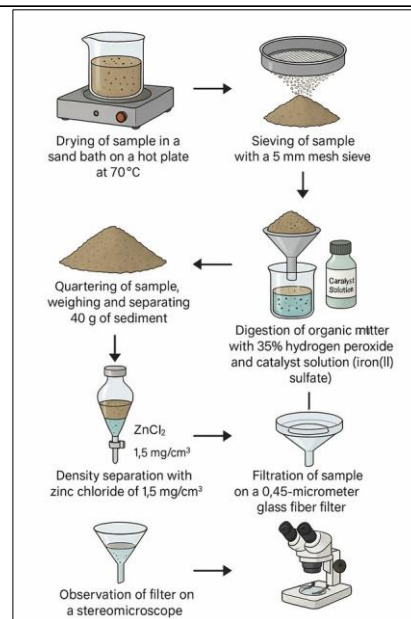


Figure 2. Flowchart of the methodology applied in sample preparation.

3. RESULTS

3.1. Spatial Distribution

Microplastic particles were found in all samples, with concentrations ranging from 300 to 16,700 particles per kg of dry sediment. The highest concentrations occurred at sites near urban centers (4, 5, 6, 7, 9, 10) and river confluence points (11, 12), reflecting the urban influence on the availability of these contaminants in the environment. The quantification of MPs by sampling site, as well as the physicochemical parameters of the samples, are shown in Table 1.

Table 1. Physicochemical parameters and quantification of microplastics from sampling points

Sample Points	TC (%)	TP (%)	TFS (%)	TVS (%)	H (%)	MPs/Kg	
1	23.3	7.05	76.70	99.25	0.75	23.30	1.825
2	28.0	7.11	76.61	98.90	1.10	23.39	2.375
3	25.0	7.35	74.75	99.36	0.64	25.25	300
4	32.7	6.93	71.80	98.52	1.48	28.20	16.700
5	35.3	7.13	79.63	99.23	0.77	20.37	4.325
6	26.7	7.58	61.01	95.00	5.00	38.99	4.725
7	36.8	7.08	75.26	96.92	3.08	24.74	4.100
8	29.3	7.15	77.21	98.63	1.37	22.79	1.000
9	31.8	7.26	69.88	95.16	4.84	30.12	4.300
10	24.8	7.43	46.18	79.02	20.98	53.82	3.925
11	25.0	7.44	78.82	95.59	4.41	21.18	5.050
12	25.0	7.50	82.96	98.13	1.87	17.04	3.675

Regarding the characterization of the findings, the most common particle shapes found were fragments and films (44.67%), followed by fibers (8.13%). Regarding color, the most common were black (42.99%) and colorless (41.68%), with sizes ranging from 13 μm to 740 μm . Table 2 shows the percentages of the characterization of the analyzed particles. Figure 3 presents examples of MPs found.

Table 2. Percentage of MPs according to their morphology

Form (%)		Color (%)		Size (μm)
Fragment	44.67	Black	42.9	13≥MPs≤740
			9	
Film	44.67	Colorless	41.6	
			8	
Fiber	8.13	Blue	5.05	
Pellet	1.17	Brown	4.81	
Sphere	0.84	Red	2.20	
Foam	0.47	Yellow	1.87	
Tangle of fibers	0.05	Whrite	1.31	
		Silver	0.09	

**Figure 3.** Examples of MPs found in the samples analyzed

3.2. Correlation with Environmental Factors

To assess the correlation between parameters, statistical analyses were performed using Python 3. Table 3 presents the descriptive statistics of the evaluated points.

Table 3. Descriptive statistics of sample data.

	Sample Points	Range $\bar{x} \pm \sigma$	Median	Variance
°C	12	23.30 – 36.80 28.64 ± 4.52	27.35	20.46
pH	12	6.93-7.58 7.25±0.21	7.21	0.04
TS	12	0.4618 - 0.8296 0.73 ± 0.10	0.76	0.01
TFS	12	0.7902-0.9936 0.96 ± 0.06	0.98	0.00
TVS	12	0.0064 – 0.2098 0.04 ± 0.06	0.02	0.00
H	12	0.17 – 0.54 0.27 ± 0.10	0.24	0.01
MPs	12	300 – 16700 174.33 ± 167.01	160.50	27891.70

To define the statistical analysis method, the Shapiro-Wilk test was used to verify whether the data followed a normal distribution and then determine whether the tests would be parametric or nonparametric. The normality test revealed that only the temperature and pH data followed a normal distribution, so the statistical approach was nonparametric.

To evaluate the relationships between the variables, Spearman's correlation was applied. The results revealed statistically relevant correlations between TVS and MPs ($r_s = 0.54$), indicating that samples with higher organic matter content also contained a greater number of plastic particles. Conversely, a negative correlation was found between TSF and MPs ($r_s = -0.54$), suggesting that samples with higher fixed solids content had fewer plastic particles. Figure 4 presents a heat map summarizing the Spearman's correlation results.

The Spearman correlation matrix results regarding the positive and negative interactions between MPs/kg and TSF and TVS percentages highlight anthropogenic influences on water bodies. TVS teor in sediments from urban areas is directly associated

with the discharge of untreated wastewater, is one of the means of introducing plastic pollutants into aquatic environments [12].

Furthermore, there is a statistically significant positive correlation between temperature, pH, and MPs. Variations in temperature and pH have been linked to increased plastic release and fragmentation, facilitating the formation of secondary microplastics, as reported by [13]. Such variations may also influence the bioavailability of polymers and their interaction with organic matter in sediments [13].

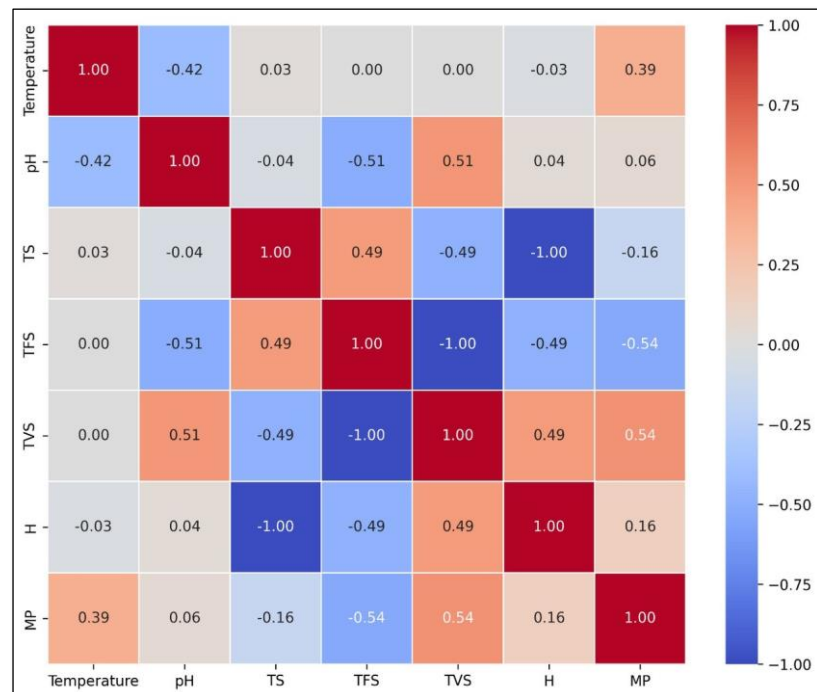


Figure 4. Spearman Correlation Heat Map.

These results indicate that local environmental conditions are key factors in the retention and persistence of microplastics in river systems.

4. DISCUSSION

The results confirm the contamination of the study area by polymeric microparticles, as well as the spatial distribution of this contamination along the flow of the studied rivers, corroborating with previous studies that rivers act as pathways for microplastic transport within the continent–ocean continuum [2–4, 9]. The occurrence of particles originating from effluent discharges (fibers) and improper waste disposal (fragments/films) underscores the urgent need to enhance urban waste management and basic sanitation infrastructure [3].

Furthermore, sedimentary microplastics, although less visible than those in surface waters, pose long-term ecological risks [12]. These particles can be ingested by benthic organisms, which form the base of the food chain, thereby perpetuating contamination across all trophic levels. They may also be resuspended and transported to downstream areas, increasing the availability of this emerging contaminant in the water column [9].

Public policies should prioritize source reduction, green infrastructure, and capture-based interventions to halt the migration of plastic pollution across the continent-ocean continuum [3].

5. CONCLUSIONS

The results demonstrated the presence of contamination in river sediments draining urban and peri-urban areas of RMC, in the semiarid Northeast of Brazil.

Fluvial sediments act as reservoirs of MPs, functioning as sinks and secondary sources of this emerging contaminant, with clear implications for the transfer of these materials from the continent to the ocean.

Effective watershed and anthropogenic source management are essential to mitigate downstream plastic transport. Multiscale actions integrating science, governance, and community engagement are necessary to address this transboundary challenge.

Funding: This research was funded by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Universal Proc. Nº 409820/2023 – 7, INCT-TMCOcean Proc. Nº405765/2022-3 e PQ Proc. Nº 316615/2023-4) and Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analysis, or interpretation of the data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

REFERENCES

1. UNEP – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. De la contaminación a la solución: Uma evaluación global de la basura marina y la contaminación por plásticos. **Síntesis**. Nairóbi, 2021, ISBN: 978-92-807-3881-0
2. ALIME, O. S., BUDARZ, J. F., HERNANDEZ, L. M., TUFENKJI, N. Microplastic and nanoplastic in aquatic environments: Aggregation, deposition and enhanced contaminant transport. **Environmental Science and Technology**. 2018, pp. 1704-1724. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05559>
3. RADFOR, F., HORTON, A. A., FEGATE, S., LICHTSCHLAG, A., HUNT, J., ANDRADE, V., SANDERS, R., EVANS, C. Factor influencing microplastic abundances in the sediments of seagrass-dominated tropical atoll. **Environmental Pollution**. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124483>
4. WANG, Y., DING, K., REN, L., PENG, A., ZHOU, S. Biodegradable microplastic: a review on the interaction with pollutants and influence to organisms. **Boletim of Environmental Contamination on Toxicology**. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03486-7>
5. SANTOS, F. L. B., TORRES, M. C., ALVES, S. J. S., BEZERRA, M. M. C. Avaliação quali-quantitativa de microplásticos em sedimentos e na coluna d'água no Balneário Canto das Águas – Glória/BA e Balneário da Prainha – Paulo Afonso/BA. **Brazilian Journal Development**. 2020. DOI: 10.3411/bjdv6n2-233
6. NETO, H. H. L. C., SILVESTRE, R. C. M., JEAN, R. N. P., SANTOS, A. V. A., SILVA, F. C. A primeira avaliação de microplásticos no Rio Xingu. **Rega**. 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.21168/reg.v20e17>
7. FONSECA, V. F. **Dinâmica e influencia de fatores ambientais e antrópicos no transporte e distribuição de microplásticos no estuário do Rio Tramandaí**. 2024. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2024.
8. ABNT. NBR 10.664:1989. Águas – Determinação de resíduos (sólidos) – Método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1989.
9. CHEN, H. L., SELVAN, S. B., TING, K. N., GIBBINS, C. N. Microplastic concentrations in river water and bed sediments in a tropical river: Implications for water quality monitoring. **School of Environmental and Geographical Sciences**. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10856-5>
10. JAHAN, S., STREZOV, V., WELDEKIDAN, H., KUMAR, R., KAN, T., SARKODIE, S. A., HE, J., DASTJERDI, B., WILSON, S. P. Interrelationship of microplastic pollution in sediments and oysters in a seaport environment of the eastern coast of Australia. **Science of the Total Environment**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.13924>
11. MARKLEY, L. A., DRISCOLL, C. T., HARTNETT, B., MARK, N., MATEOS, C. A., HAPICH, H. **Guide for the visual identification and classification of plastic particles**. 2024. DOI: 10.13140/rg.2.2.22628.76166
12. ZHOU, J., LIU, X., LI, W., CAO, Y. Characteristics sources and distribution of microplastics in sediments and their potential ecological risks: A case study in a typical urban river of China. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114575>
13. LEI, J., MA, Q., DING, X., PANG, Y., LIU, Q., WU, J., ZHANG, H., ZHANG, T. Microplastic environmental behavior and health risk assessment: a review. **Environmental Chemistry Letters**. 2024, v. 22, pp. 2913-2941. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-024.01771-x>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Morphological Characterization of Microplastics in Sediments of the Itapecuru River (MA) and their Relationship with Physical-Chemical Parameters

Gabriella Braga Feitosa¹, Sabrina Duarte Alencar¹, Marcella Araújo Macêdo², Jorge Marcell Coelho Menezes³, Celme Torres Ferreira da Costa⁴, Francisco José de Paula Filho⁴

¹ Undergraduate in Materials Engineering - Federal University of Cariri (UFCA); braga.gabriella@aluno.ufca.edu.br; sabrina.alencar@aluno.ufca.edu.br

² Master's student in the Postgraduate Program in Sustainable Regional Development (PRODER) – Federal University of Cariri (UFCA); marcella.macedo@aluno.ufca.edu.br

³ Laboratory Technician at the Analytical Laboratory – Federal University of Cariri (UFCA); jorge.menezes@ufca.edu.br

⁴ Permanent Professor of the Graduate Program in Sustainable Regional Development (PRODER) – Universidade Federal do Cariri (UFCA); celme.torres@ufca.edu.br; francisco.filho@ufca.edu.br(Advisor)

* Correspondence: marcella.macedo@aluno.ufca.edu.br; (88) 99632-8024

Abstract: The increased production, consumption, and improper disposal of plastics have resulted in the accumulation of microplastics (MPs) in aquatic ecosystems, including rivers and estuaries. This study investigated the presence and morphological characteristics of MPs in the Itapecuru River, Maranhão, as well as the physicochemical properties of water and sediment at three sampling points (P01, P02, and P03). Sediment samples were analyzed to quantify and characterize MPs by morphology and color, in addition to determining pH, electrical conductivity, and solids composition. MPs were detected at all points, with a predominance of colored fibers (blue, black, red, and transparent) and the occasional presence of fragments. P02 presented higher moisture and volatile solids, indicating a greater organic contribution, while P01 and P03 exhibited predominantly mineral sediments. These compositional patterns suggest different deposition regimes and potential sources of MPs, associated with domestic effluents, fishing activities, and plastic waste degradation. The results reinforce that the Itapecuru River estuary presents diffuse MP contamination, the distribution of which is directly related to sedimentary characteristics and land use and occupation in its basin.

Keywords: Microplastic; Sediment; Estuary

1. INTRODUCTION

The increase in production, consumption, and improper disposal of plastics has led to a progressive accumulation of these materials in ecosystems, resulting in major global environmental concerns. The fragmentation of larger plastic waste through physical, chemical, and biological processes gives rise to microplastics (MPs), which are defined as plastic particles ranging in size from 1 µm to 5 mm, resulting from the mechanical, chemical, and biological degradation of larger plastic products [1]. These contaminants have been detected in all ecosystems, including water, sediments, and living organisms, with impacts on biota and human health that are not yet fully understood.

There is a substantial and growing amount of plastic pollution in the environment, and it is estimated that the flow of plastic waste into the oceans, primarily from land-based sources, will continue to increase over the next decade. Due to their high durability, these materials can accumulate and persist in the environment for long periods. Plastics negatively affect marine life and ecological processes, in addition to impacting the economy and society, whether by compromising food security, human well-being, or coastal economic activity [2].

Although most research on MPs focuses on marine environments, more recent studies have also highlighted their presence and accumulation in freshwater ecosystems such as rivers and estuaries. In these environments, sediments serve as important sinks for microplastics, resulting in recurring and long-term contamination, in addition to representing the main route of exposure for benthic organisms and bottom-feeding fish species.

The highest concentration of MPs in sediments occurs in the surface layers, and their vertical distribution is directly related to the intensity of anthropogenic activities and local hydrodynamic characteristics [3].

Their classification can consider color, stage of erosion, shape (microfibers, films, microspheres, and fragments), or polymer composition. Their chemical stability, difficulty in degrading, and ability to adsorb other contaminants make MPs a persistent threat, already recorded in multiple species and ecosystems [4].

In Brazil, the presence of microplastics has been recorded in several rivers in the Amazon region, including the Amazon estuary and its tributaries. However, there is still a lack of information on the presence and behavior of these contaminants in pre-Amazonian rivers in Northeastern Brazil, such as the Itapecuru River, located in the state of Maranhão. This study aimed to assess the presence and concentration of microplastics in the sediments of the Itapecuru River, in addition to characterizing the fragments found in terms of morphology and color.

2. MATERIALS AND METHODS

The study area comprises the Itapecuru River basin, located entirely in the state of Maranhão, in the Northeast region of Brazil, with an area of 53,156.30 km², covering a total of 58 municipalities and a population of 1,759,871 inhabitants [5]. In order to evaluate the presence and abundance of MPs in the surface sediments of the Itapecuru River, three collection points were selected along its estuary (Figure 1).

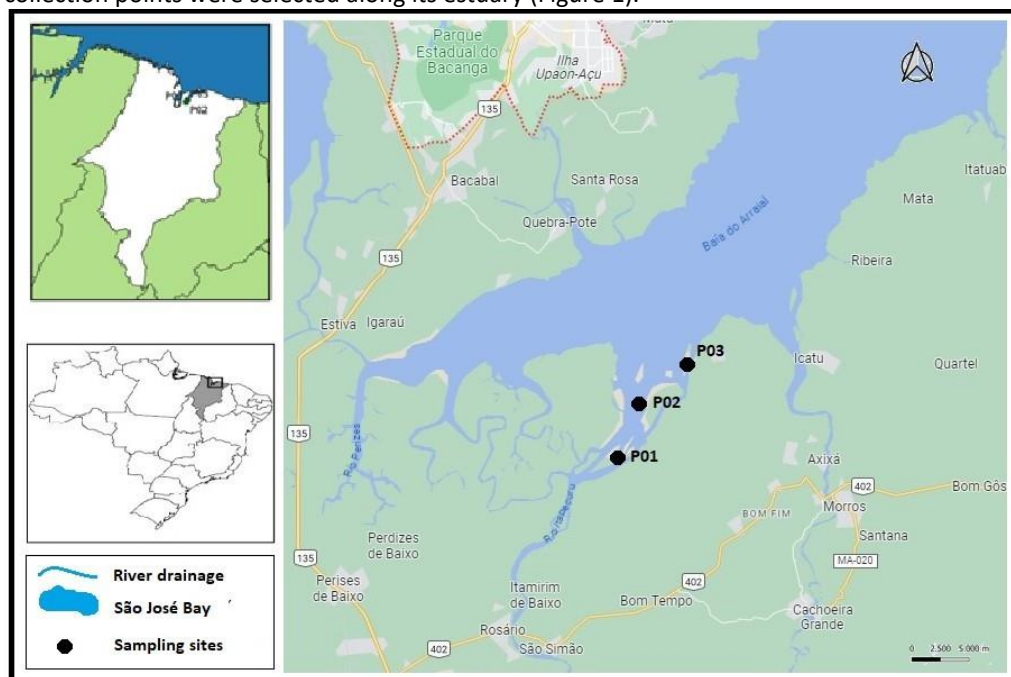


Figure 1. Location of sampling sites

In the field, the pH and electrical conductivity (ED) of the water were determined using previously calibrated multiparameter probes. The sediment samples were placed in properly sealed glass containers and transported in thermal boxes. After transportation, they were stored refrigerated until laboratory analysis.

The analyses were conducted at the Central Analytical Laboratory of the Federal University of Cariri (UFCA). Prior to preparing the samples for microplastics, the solid fractions were determined following the methodology established by ABNT NBR 10664:1989 [6]. Sample preparation for microplastic analysis involved the following steps: (i) sediment drying; (ii) digestion of organic matter; (iii) density separation; (iv) filtration; and (v) microscopic quantification of microplastics.

During the drying stage, the samples were initially placed on a hot plate to remove excess liquid. They were then transferred to an oven at 100°C, where they remained for approximately 1 hour, or until all moisture was completely eliminated.

The organic matter digestion step was performed with 40.0000 g of dry, previously sieved sample, using the quartering technique to ensure the homogeneity of the subsample. A 35% hydrogen peroxide (H₂O₂) solution (Dinâmica Química Contemporânea Ltda) and catalyst solution (15 g of FeSO₄ • 7H₂O + 3 mL of H₂SO₄ to 1 L) in a 1:1 ratio were added. The process was

repeated until the reactions ceased (as observed by the cessation of bubbling and thermal stabilization)

For density separation, a saturated 97% zinc chloride (ZnCl_2) solution (ACS Cientific) with an approximate density of 1.5 g/cm^3 was used, which was capable of isolating low-density plastic particles. The samples were allowed to settle for 24 hours, allowing the MPs to float. The supernatant was then carefully filtered through glass fiber membranes (Whatman™) to retain the particles.

Visualization and quantification of microplastics were performed using an ECZ-BLACK microscope, where the particles were classified according to morphological characteristics (shape and color).

3. RESULTS

Analysis of sediment samples from the Itapecuru River (P01, P02, and P03) revealed the presence of microplastics (MPs) at all sampling points, demonstrating widespread contamination throughout the river system. The predominant morphological category was fibers, particularly blue, black, red, and transparent, while fragments were less abundant. This pattern suggests that the MPs found derive primarily from synthetic textile fibers from domestic and industrial effluents, while the fragments are associated with the secondary degradation of packaging and plastic materials discarded in the environment. Figure 2 shows some of the MPs found in sediment samples from the Itapecuru River estuary in



Maranhão.

Figure 2. Microplastics found in samples from the Itapecuru River/MA.

Overall, sample P03 presented the highest concentration of MPs (275 particles/kg), with a focus on black fibers (125 particles/kg) and blue fibers (100 particles/kg). This result may indicate greater anthropogenic pressure in this stretch of the river, possibly related to its proximity to urban areas or greater intensity of human activities. In contrast, P01 presented a lower total abundance (175 particles/kg), but still showed a predominance of fibers, especially blue (75 particles/kg) and clear (50 particles/kg). P02 exhibited an intermediate concentration (125 particles/kg), with a balanced presence of blue fibers (75 particles/kg), red fibers (25 particles/kg), and green fragments (25 particles/kg).

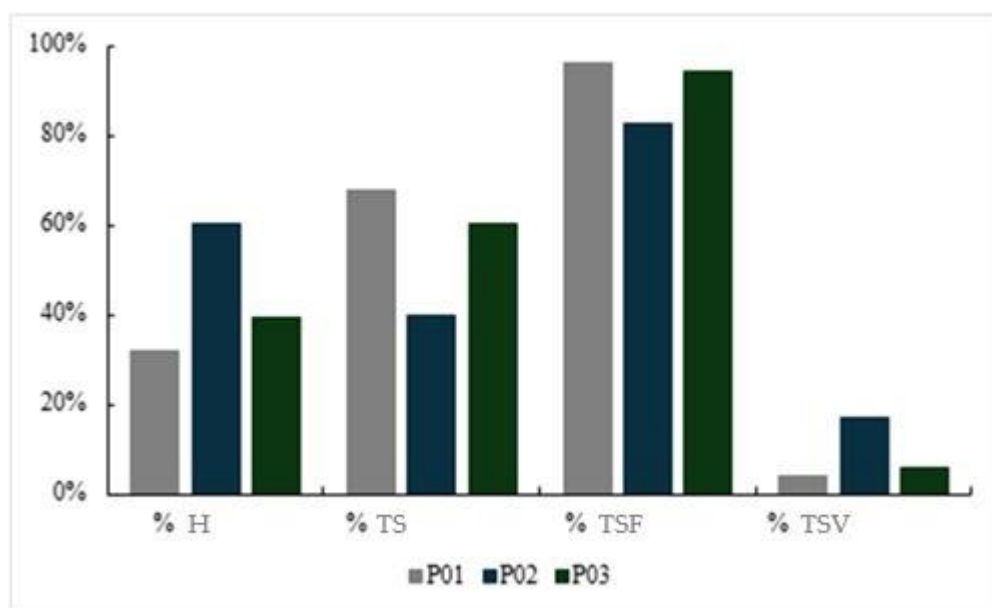
Table 1 presents the quantification of MPs/kg of dry samples. Blue fiber was repeated in all samples. Sample P03 presented the highest quantification overall. Fibers are generally associated with synthetic textile waste (polyester, nylon, and acrylic), which enters the aquatic environment mainly through domestic and industrial wastewater [8]. Fragments originate from the breakdown of larger plastics, such as packaging, bags, or household/industrial parts, after physical degradation, photooxidation, or abrasion processes [8].

Table 1. Quantification and morphological characterization of microplastics detected in samples from the Itapecuru River.

Total	(MPs/Kg)	Shape	Sample
175	75	Blue Fiber	P01
	50	Colorless Fiber	
	25	Blue Fragment	
	25	Black Fiber	
125	75	Blue Fiber	P05
	25	Red Fiber	
	25	Green Fragment	
275	100	Blue Fiber	P09
	50	Red Fiber	
	125	Black Fiber	

Solids analyses performed at sampling points in the Itapecuru River (P01, P02, and P03) revealed significant differences in the physical and chemical composition of the sediments, reflected in moisture, total solids, fixed solids, and volatile solids contents. Point P5 presented the highest moisture content (~60%) and the highest volatile solids fraction (~18%), suggesting a greater contribution of organic matter to the sediment composition. In contrast, P1 and P9 exhibited higher fixed solids values (over 90%), indicating a predominance of mineral fractions and a lower contribution of organic material.

These differences highlight the spatial heterogeneity in the sediment composition of the Itapecuru River and indicate that different deposition regimes can influence the distribution and morphology of the microplastics found. Under such conditions, low-density microplastics, such as polypropylene and polyethylene fibers, tend to sediment together with organic matter [9]. Figure 3 shows the percentages of solids and moisture at the sampling sites.

**Figure 3.** Analysis of solids from samples from the Itapecuru River, MA.

The physical and chemical parameters of the analyzed water indicated pH values ranging from 7.15 to 7.99, characterizing a slightly alkaline environment. Electrical conductivity, in turn, ranged from 23.08 to 31.4 mS/cm, values that reflect typical river conditions but may also be associated with the presence of dissolved salts and possible anthropogenic contaminants [10]. These results suggest that, although these water parameters remain within the expected standards for tropical rivers, there are signs of influence from external discharges, whether domestic, industrial, or surface runoff.

4. DISCUSSION

The results confirm the presence of microplastics in all sampling sites in the Itapecuru

River estuary, with a predominance of colored fibers and a distribution influenced by sedimentary characteristics. The integration of morphological, physicochemical, and solids analyses shows that different deposition regimes in the riverbed affect the retention and type of accumulated microplastics, reinforcing the need for monitoring strategies that consider both sediment composition and potential pollution sources [11].

The relationship between the physicochemical parameters of the sediment and the abundance of MPs reveals that areas with higher organic matter content (such as P02) presented greater retention of fibers and fragments, corroborating studies that indicate the preferential deposition of low-density plastic particles alongside particulate organic matter. In points with a predominance of minerals (P01 and P03), the presence of MPs suggests diffuse input, likely associated with river transport and deposition by local hydrodynamic processes. The water's pH and conductivity values, although within ranges typical of river environments, suggest the influence of anthropogenic discharges, possibly related to urban and agricultural runoff. Therefore, the presence of MPs cannot be interpreted in isolation but must be understood as part of a broader scenario of diffuse and cumulative pollution.

This body of evidence highlights that microplastic contamination in the Itapecuru River is multifactorial, being conditioned by both the nature of the sediments and the anthropogenic pressures exerted on the watershed. These findings highlight the need for environmental monitoring strategies that incorporate sediment dynamics, discharge origin, and local physicochemical characteristics as key variables in assessing MP pollution.

5. CONCLUSION

This study confirms the widespread presence of microplastics in the sediments of the Itapecuru River, Maranhão, evidencing a predominance of colored synthetic fibers associated with domestic and industrial sources. Differences in sediment composition between sampling points indicate that MP deposition and retention are modulated by factors such as organic matter theory, particle size, and local hydrodynamic dynamics.

Taken together, the results demonstrate that MP pollution in the Itapecuru River estuary reflects the interaction between diffuse pollution sources, the lack of adequate wastewater treatment infrastructure, and the basin's specific environmental characteristics.

Therefore, the morphological characterization of microplastics, combined with the analysis of physical and chemical parameters, constitutes an essential tool for understanding the pollution dynamics of the Itapecuru River and supporting mitigation strategies that are not related to the conservation of regional water resources.

Funding: This research was funded by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Universal Proc. Nº 409820/2023 – 7, INCT – TMCOcean Proc. . Nº405765/2022-3 e PQ Proc. Nº 316615/2023-4) and FUNCAP.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analysis, or interpretation of the data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

REFERENCES

- [1] Andraday, A.L. The plastic in microplastics: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 2017, 119, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- [2] Courteney-Jones, W.; Maddalene, T.; James, M. K.; Smith, N. S.; Youngblood, K.; Jambeck, J. R.; Earthrowl, S.; Delvalle-Borrero, D.; Penn, E.; Thompson, R. C. Source, sea and sink—A holistic approach to understanding plastic pollution in the Southern Caribbean. *Sci. Total Environ.* 2021, 797, 149098. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149098>
- [3] Zhou, Z.; Zhang, Y.; Fu, C.; Xie, W.; Zhang, L.; Chen, X.; Wang, J. Vertical microplastic distribution in sediments of Fuhe River estuary to Baiyangdian Wetland in Northern China. *Chemosphere* 2021, 280, 130800. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130800>
- [4] Gholizadeh, M.; Shadi, A.; Maryam Abadi, A.; Nemati, M.; Senapathi, V.; Karthikeyan, S. Abundance and characteristics of microplastic in some commercial species from the Persian Gulf, Iran. *J. Environ. Manage.* 2023, 344, 118386. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118386>
- [5] Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF). Itapecuru. Available online: <https://www.codevasf.gov.br/acesso-a-informacao/institucional/area-de-atuacao/bacia-hidrografica/itapecuru> (accessed on 5 August 2025).
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 10664:1989 – Vazão em poços tubulares – Medição e apresentação de resultados. ABNT: Rio de Janeiro, Brazil, 1989.

- [7] Leal, M.D.V.; Silva, R.P.; Sousa, F.M.; Rocha, A.J.M.; Santos, E.M. Impacto antrópico e qualidade das águas no baixo curso do Rio Itapecuru. *InterEspaço: Rev. Geogr. Interdiscip.* 2023, 9, e202315. <https://doi.org/10.18764/2446-6549.e202315>
- [8] Mesacasa, A.; Deola Deminski, C.C. Fibras têxteis sintéticas e a liberação de microplásticos: uma revisão. *Mix Sustentável* 2023, 9(1), 80–90. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n1.80-90>
- [9] Schmid, K.; Köhler, A.; Fries, E. Density-driven deposition patterns of microplastics in estuarine sediments. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2024, 293, 108511. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108511>
- [10] Marmontel, C.V.F.; Rodrigues, V.A. Parâmetros indicativos para qualidade da água em nascentes com diferentes coberturas de terra e conservação da vegetação ciliar. *Floresta e Ambiente* 2015, 22(2), 171–181. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.082014>
- [11] Li, J.; Liu, H.; Chen, J.P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Res.* 2018, 137, 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Percepções de estudantes do ensino fundamental sobre os impactos dos plásticos nos oceanos

Gabriel Nunes ¹, Mateus Henrique ¹, Felipe Haniel ¹ and Heverton Alencar ^{1,*}

¹ Colégio Santa Madalena Sofia;

* Correspondence: heverton.silva@msofia.com;

Abstract: A poluição por plásticos nos oceanos é uma das principais ameaças aos ecossistemas marinhos, afetando diretamente a fauna, a saúde humana e a qualidade ambiental. Este estudo investigou como estudantes do 6º ano do ensino fundamental percebem os impactos do plástico no ambiente marinho. Por meio da aplicação de um questionário estruturado com abordagem quantitativa, foram analisadas as percepções de alunos de uma escola particular. Os resultados indicam que os estudantes têm uma compreensão geral satisfatória sobre as causas e consequências da poluição plástica, reconhecendo fontes comuns de descarte inadequado e estratégias básicas de mitigação. Também foi observado um forte envolvimento emocional com o tema, evidenciado por sentimentos de preocupação, tristeza e indignação frente aos danos causados à vida marinha. Embora apresentem um bom nível de conscientização, os alunos ainda demonstram lacunas conceituais relevantes, especialmente quanto à diversidade de espécies afetadas e à importância da redução do consumo. Os dados evidenciam a importância de fortalecer a educação ambiental desde os primeiros anos escolares.

Keywords: Oceano; Plástico; Percepção

1. INTRODUCTION

O plástico é atualmente um material onipresente, presente em praticamente todos os setores da economia e aspectos da vida moderna [1]. Estima-se que mais de 400 milhões de toneladas de plástico sejam produzidas globalmente a cada ano, das quais uma parcela significativa acaba mal gerida e chega aos ecossistemas aquáticos [2]. A cada ano, cerca de 13 milhões de toneladas de plástico vão parar nos oceanos [3], afetando diretamente a biodiversidade marinha, a saúde humana e a economia costeira. Na União Europeia, entre 80% e 85% do lixo marinho, medido em mutirões de limpeza de praias, é composto por plásticos, sendo que itens de uso único respondem por aproximadamente 50%. No Brasil, estudos apontam que 70% dos resíduos encontrados em ações de limpeza de praias são plásticos, principalmente embalagens descartáveis [4]. Esses números evidenciam a urgência de compreender a relação entre sociedade e natureza frente à crise da poluição plástica. Uma ferramenta promissora nesse contexto é a investigação de percepções e atitudes dos indivíduos, que pode fornecer informações relevantes para o manejo sustentável e para estratégias de educação ambiental [5,6]. Assim, compreender como estudantes percebem esse problema é essencial, uma vez que a educação ambiental desempenha papel estratégico na formação de cidadãos críticos e conscientes. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar a percepção de alunos do 6º ano do ensino fundamental sobre os impactos do plástico nos oceanos.

2. MATERIALS AND METHODS

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa observacional, de caráter descritivo e abordagem quantitativa. Os dados foram coletados por meio de um questionário estruturado, elaborado no Microsoft Forms, contendo questões fechadas referentes à percepção dos alunos sobre os impactos do plástico nos oceanos e possíveis soluções para a mitigação do problema. O link de acesso, disponibilizado em formato de QR Code, foi distribuído às turmas do 6º ano do Colégio Santa Madalena Sofia. A participação foi voluntária e anônima, garantindo-se o sigilo das respostas. A coleta de dados ocorreu em outubro de 2024. Para a análise, adotou-se a estatística descritiva, com cálculo de frequências absolutas e relativas. Esse procedimento permitiu sintetizar as percepções dos estudantes e identificar tendências nas respostas.

3. RESULTS

Nossa amostra foi composta por 49 alunos do 6º ano do Colégio Santa Madalena Sofia, abrangendo quatro turmas. Os resultados mais gerais (tabela 1) mostraram que os alunos possuem um bom conhecimento sobre o impacto dos plásticos nos oceanos, conforme evidenciado pela Tabela 1. Quando questionados sobre a origem do plástico nos oceanos, a maioria (54%) apontou corretamente os rios e esgotos como principal fonte, enquanto 27% mencionaram as praias e 15% os lixões. Quanto aos impactos do plástico na fauna marinha, 48% dos alunos citaram as tartarugas como as mais afetadas, seguidos por 46% que reconheceram que toda a fauna sofre impactos. Apenas 4% mencionaram especificamente os peixes. Em relação às estratégias de mitigação, a maioria (63%) indicou corretamente ações como coleta seletiva, redução e reciclagem. Outros 19% mencionaram somente reciclagem, e 10% destacaram a redução no consumo. Sobre a degradação do plástico, 63% afirmaram que leva muitos anos para se decompor, 27% disseram que ele se transforma em microplástico, e 10% ressaltaram que animais acabam se alimentando desses resíduos.

Tabela 1. Distribuição das respostas dos participantes sobre origem, impactos, mitigação e degradação do plástico nos oceanos. Os valores entre parênteses representam a porcentagem de respostas em cada categoria.

Respostas			Perguntas
Lixões (15%)	Praias (27%)	Rios e esgotos (54%)	Origem do plástico
Peixes (4%)	Toda Fauna (46%)	Tartarugas (48%)	Impactos na fauna
Redução no consume (10%)	Reciclagem (19%)	Coleta seletiva, redução e reciclagem (63%)	Mitigação
Animais se alimentam (10%)	Se transforma em microplástico (27%)	Muitos anos de decomposição (63%)	Degradação do plástico

Adicionalmente, a nuvem de palavras (Figura 1) revelou os sentimentos e percepções dos alunos em relação à poluição dos oceanos por plástico. A palavra mais destacada foi "Tristeza" (48%), evidenciando uma forte resposta emocional ao tema. Outras palavras frequentes incluíram "Preocupação", "Nojo", "Raiva", "Dor", "Indignação", e "Decepção", refletindo um alto nível de conscientização e empatia com os impactos ambientais causados pelos resíduos plásticos. Também surgiram palavras como "oceanos sujos", "muitos animais marinhos" e "praias", que reforçam a compreensão dos alunos sobre os locais e seres afetados.



Figura 1. Nuvem de palavras representando os sentimentos expressos pelos alunos em relação ao plástico nos oceanos.

4. DISCUSSION

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que os alunos do 6º ano do ensino fundamental possuem um nível satisfatório de compreensão acerca da problemática dos plásticos nos oceanos, corroborando pesquisas anteriores que destacam o potencial da educação ambiental como ferramenta para ampliar o conhecimento e a conscientização sobre questões socioambientais desde a infância [5].

A identificação correta, pela maioria dos participantes, dos rios e sistemas de esgoto como principais fontes de entrada do plástico no mar indica uma percepção alinhada com estudos recentes, que mostram que 70–80 % da poluição plástica marinha provém de fontes terrestres, especialmente via transporte fluvial [7]. Modelagens de alta resolução indicam que mais de 1 000 rios são responsáveis por cerca de 80 % do fluxo de plásticos para os oceanos, totalizando entre 0,8 e 2,7 milhões de toneladas por ano [8]. Além disso, pesquisas recentes demonstram que resíduos plásticos provenientes de atividades agrícolas podem se acumular em leitos de rios secos e ser transportados para o mar durante eventos de chuvas intensas, revelando a diversidade de rotas que contribuem para a poluição plástica além do ambiente urbano [9]. Esses dados reforçam a pertinência da percepção dos alunos, mas também evidenciam a necessidade de ampliar a compreensão sobre a multiplicidade de fontes e contextos envolvidos.

Quanto aos impactos sobre a fauna, a ênfase dos estudantes nas tartarugas como grupo mais afetado reflete tanto a eficácia de campanhas de sensibilização — que frequentemente utilizam essa espécie como símbolo — quanto uma possível limitação na percepção dos demais organismos marinhos impactados, como aves, peixes e mamíferos [6]. Estudos globais têm demonstrado que praticamente todos os grupos da fauna marinha sofrem consequências do contato com o plástico, seja por ingestão, emaranhamento ou bioacumulação de microplásticos [3]. Portanto, embora os alunos demonstrem consciência, ainda é necessário fortalecer a visão de que os efeitos não se restringem a espécies emblemáticas.

No que se refere às estratégias de mitigação, a predominância das respostas relacionadas à coleta seletiva, redução e reciclagem mostra alinhamento com as recomendações de organismos internacionais, que defendem a combinação de prevenção, reutilização e reciclagem como medidas centrais para conter a crise dos resíduos plásticos [6]. Entretanto, a menor ênfase dada à redução no consumo indica uma lacuna importante, visto que essa prática é considerada a forma mais eficaz de enfrentamento do problema [4]. Essa tendência também aparece em outros estudos de percepção pública, nos quais a ênfase recai mais sobre a reciclagem do que sobre a diminuição do uso de plásticos descartáveis [5].

Outro aspecto relevante observado neste estudo foi a dimensão emocional das respostas, evidenciada pelas palavras mais frequentes na nuvem de palavras, como “tristeza”, “preocupação” e “indignação”. Esse componente afetivo reforça a ideia de que a sensibilização ambiental não se restringe ao campo cognitivo, mas mobiliza valores, empatia e emoções, fatores que têm papel central na formação de atitudes pró-ambientais [5]. Pesquisas em psicologia ambiental sugerem que a combinação entre informação e engajamento emocional é um dos caminhos mais eficazes para estimular mudanças comportamentais sustentáveis ao longo do tempo [6].

Assim, os achados deste estudo demonstram que, embora os estudantes apresentem uma compreensão geral satisfatória da problemática da poluição plástica, ainda existem lacunas conceituais, especialmente no reconhecimento da diversidade de espécies afetadas e na valorização da redução do consumo como principal estratégia de mitigação. Esses resultados reforçam a importância da continuidade e do fortalecimento de programas de educação ambiental, que devem integrar informações científicas atualizadas, sensibilização emocional e estímulo a práticas preventivas, visando à formação de cidadãos mais críticos, conscientes e engajados com a preservação dos ecossistemas marinhos.

5. CONCLUSIONS

Os resultados indicam que os alunos possuem um grau de conhecimento satisfatório sobre os impactos do plástico nos oceanos, demonstrando consciência sobre a origem do problema, seus efeitos na fauna marinha e as possíveis formas de mitigação. Dentre as recomendações apontadas para enfrentar essa problemática, destacam-se a redução do consumo de plástico, o estímulo a políticas públicas voltadas à reciclagem e reutilização, bem como o incentivo a empresas que desenvolvem e utilizam plásticos biodegradáveis.

Esses dados reforçam a importância da educação ambiental nas escolas como ferramenta fundamental para formar cidadãos mais críticos e engajados na preservação dos ecossistemas marinhos. Investir em ações educativas desde os anos iniciais pode contribuir significativamente para a construção de uma sociedade mais consciente e sustentável.

REFERENCES

1. Geyer, R.; Jambeck, J.R.; Law, K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 2017, 3, e1700782.
2. Jambeck, J.R.; Geyer, R.; Wilcox, C.; Siegler, T.R.; Perryman, M.; Andrady, A.; Narayan, R.; Law, K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 2015, 347, 768–771.
3. United Nations (UN). Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution. Available online: <https://www.unep.org/resources/report/global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (accessed on 4 September 2025).
4. Andrades, R.; Martins, A.S.; Fardim, L.M.; Ferreira, C.E.L.; Di Dario, F.; Andrade, C.G.T.J.; Reis-Filho, J.A. Plastic pollution on Brazilian beaches: Baseline for monitoring. *Mar. Pollut. Bull.* 2020, 150, 110693.
5. Roca, E.; Villares, M.; Ortego, M.I. Public perceptions for marine ecosystem restoration: A case study in the Catalan coast. *Mar. Policy* 2009, 33, 1–7.
6. United Nations Environment Programme (UNEP). From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution. Available online: <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (accessed on 4 September 2025).

-
7. Our World in Data. *Where does the plastic in our oceans come from?* Available online: <https://ourworldindata.org/ocean-plastics> (accessed on 4 September 2025).
 8. Meijer, L.J.J.; van Emmerik, T.; van der Ent, R.; Schmidt, C.; Lebreton, L. More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic flux into the ocean. *Sci. Adv.* 2021.
 9. Morales-Caselles, C.; Viejo, J.; Montero, E.; Cózar, A. Agricultural plastic pollution in dry riverbeds as a hidden pathway to the sea. *iScience* 2025, 33, 109876. Available online: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12164007/> (accessed on 4 September 2025).

PescApp: inovação tecnológica para monitoramento da pesca artesanal e quantificação de plásticos nos oceanos.

Jordana Rangely^{1*}, Luna Gomes², Anny Silva², Lucia Magalhães², Ednildo Macena² and Diego Santos²

¹ Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Alagoas; jordana.oliveira@ifal.edu.br; lag2@aluno.ifal.edu.br; ayss1@aluno.ifal.edu.br; lfsm3@aluno.ifal.edu.br; ednildo.filho@ifal.edu.br; diego.daguia@ifal.edu.br.

* Correspondence: e-mail jordana.oliveira@ifal.edu.br

Abstract: Small-scale fisheries are essential for global food security, poverty reduction, and livelihoods, yet they are often data-poor, which limits effective management and sustainable use. In Alagoas, Brazil, official statistics on artisanal fisheries are outdated, and monitoring initiatives are fragmented. This study aimed to develop PescApp, a mobile application to collect landing data, generate periodic reports, and support participatory management. Data collection involved literature review and semi-structured interviews with fishers, managers, and researchers to identify key variables such as captured species, fishing effort, and the presence of plastic debris. The application was designed with a user-centered approach and implemented using Flutter and a SQL relational database, compatible with Android and iOS devices. PescApp enables real-time recording of fisheries data, integrates local ecological knowledge with scientific requirements, and provides information on plastic pollution in artisanal fishing. The app also formalizes fishers' activities, supporting professional recognition and gender equity. The results demonstrate that mobile technologies can effectively bridge data gaps in small-scale fisheries, facilitating science-based decision-making and environmental monitoring. PescApp represents a scalable tool to enhance sustainable fisheries management, inform policy, and contribute to the United Nations Sustainable Development Goals.

Keywords: artisanal fisheries; landing monitoring; plastic pollution; mobile application; sustainable management.

1. INTRODUÇÃO

A pesca de pequena escala vem recebendo crescente atenção internacional por desembarcar cerca de 50% das capturas globais de pesca marinha e empregar cerca de 51 milhões de pessoas ao redor do mundo, 90% das pessoas envolvidas na pesca (FAO, 2022) [1]. Suas contribuições são fundamentais para a segurança alimentar e para a redução da pobreza, especialmente nos países em desenvolvimento, desempenhando um papel crucial no alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU (Golden *et al.* 2021) [2]. Centenas de milhões de pessoas em toda a cadeia de produção dependem dessa indústria para sua subsistência, sendo ela uma força motriz econômica e social (Hilborn *et al.*, 2020) [3]. Consequentemente, a pesca de pequena escala contribui diretamente para a segurança alimentar, redução da pobreza, nutrição global, emprego e melhoria das condições socioeconômicas de grande parte da população (Batista *et al.* 2014) [4]. No entanto, essas pescarias frequentemente carecem de dados históricos importantes, o que resulta na falta de avaliação adequada e no sub gerenciamento dos estoques pesqueiros (Hilborn *et al.*, 2020) [3].

Atualmente, no Brasil não existe um programa contínuo de estatística pesqueira, principalmente para a pesca artesanal. Sendo a produção do ano de 2011 o último dado oficial publicado (MPA, BRASIL, 2011) [5]. As iniciativas que visam suprir essa lacuna são pontuais, principalmente por parte das Universidades, com os pesquisadores, que só abrangem pequenas porções da costa Brasileira (Rangely *et al.* 2023, Ferreira *et al.* 2021) [6,7]. Essa falta de dados é reconhecida como uma das grandes ameaças ao manejo de estoques e conservação dos recursos pesqueiros, limitando as possíveis tomadas de decisões (Ruffino, 2014, Davis & Hanich, 2022) [8,9]. Isso gera escassez de dados científicos e estatísticas de pesca confiáveis (Fonteles *et al.* 2023) [10]. O que pode levar à superestimativa da disponibilidade de recursos, influenciando a legislação pesqueira e colocando em risco o manejo sustentável da pesca com consequências para os meios de subsistência e a segurança alimentar (Doria *et al.*, 2018) [11].

Devido à grande importância econômica e social da pesca artesanal no estado de Alagoas (Rangely et al. 2010) [12], e levando em consideração que a grande parte dos estoques pesqueiros estão sobre pescados ou totalmente explorados (FAO, 2022) [1], é imprescindível a busca por inovações tecnológicas que venham subsidiar a tomada de decisões em busca de uma pesca sustentável. Nesse sentido, O programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração (PELD) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) na Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais (APACC) tem trabalhado com os pescadores artesanais na área de abrangência e exposto a necessidade de uma coleta eficiente de dados de desembarques pesqueiros na região, pois ainda é praticamente inexistente, com ações pontuais e descontínuas (ICMBIO, 2023, PELD APACC, 2023). [13,14]

Entre essas ameaças, a poluição por plásticos se destaca como uma das mais graves. Estima-se que mais de 11 milhões de toneladas de plástico cheguem aos oceanos a cada ano, podendo quase triplicar até 2040 sem ações efetivas (Borrelle et al., 2020) [15]. Resíduos como redes descartadas e embalagens causam emalhamento de espécies e danos físicos, enquanto micro e nanoplásticos afetam níveis tróficos inferiores, bioacumulam na cadeia alimentar e podem alcançar o consumo humano (Kühn et al., 2015; Rochman et al., 2019) [16,17]. Integrar o monitoramento da presença de plásticos durante as atividades de pesca artesanal, por meio de ferramentas inovadoras de coleta de dados, é essencial para gerar informações inéditas sobre a magnitude e os impactos desse poluente em áreas costeiras.

O presente trabalho objetivou desenvolver um aplicativo para coletar automaticamente informações de desembarque pesqueiro, gerar relatórios periódicos e apoiar uma gestão mais informada e participativa, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030. Os dados obtidos permitem identificar as principais espécies comercializadas, calcular indicadores como captura por unidade de esforço, identificar se veio plástico durante a pescaria e subsidiar futuras atualizações para abranger todo o litoral de Alagoas. Do ponto de vista social, o registro formal da atividade fornece comprovação profissional, possibilitando que pescadores tenham acesso à Previdência Social e maior reconhecimento econômico. Tal medida é particularmente relevante para as mulheres, que enfrentam histórico de invisibilidade e desigualdade no setor, contribuindo para promover maior equidade de gênero (Dantas, 2010) [18].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo o primeiro passo foi realizada a revisão de literatura, com pesquisas bibliográficas e documentais, para o levantamento de dados a respeito das espécies de peixes capturados na região marinha e estuarina Alagoana. Posteriormente foram realizadas entrevistas com pescadores artesanais das comunidades de pesca artesanal do litoral norte de Alagoas, área correspondente a APA Costa dos Corais. Os entrevistados iniciais foram os líderes locais que depois recomendaram outros pescadores para a pesquisa, seguindo o método bola de neve (Gabor, 2007) [19]. Também foram realizadas entrevistas com os gestores da pesca artesanal e cientistas pesqueiros do PELD APA Costa dos Corais, com a finalidade de alinhar o conhecimento científico ao conhecimento ecológico local (LEK). A entrevista foi de forma semi-estruturada, seguindo um roteiro sistematizado de coleta de dados, segundo Manzini (2003) [20].

A partir desses dados forma definidas as variáveis e funcionalidades incluídas no aplicativo e suas interações. Em seguida foi elaborado o design do aplicativo, com o desenvolvimento de uma identidade visual para o aplicativo, como uma “logo” e um nome de fácil pronúncia e memorização. O design do aplicativo seguiu o conceito User Interface, para que a interface possa ir além da estética, sendo intuitivo, reduzindo as barreiras à adoção da tecnologia, melhorando a acessibilidade, ou seja elaborado pensando na interação dos atores da pesca (Garrett, 2002) [21].

A versão final do aplicativo foi desenvolvida por meio de codificação utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) Visual Studio Code, uma ferramenta amplamente utilizada por desenvolvedores para edição, depuração e execução de códigos, que oferece recursos avançados para facilitar o processo de programação. O Visual Studio Code possibilita a integração com diversas linguagens e frameworks, proporcionando flexibilidade e eficiência no desenvolvimento do software. A linguagem utilizada no app foi a Flutter.

Para o armazenamento das informações coletadas pelo aplicativo, foi utilizado um banco de dados relacional baseado em SQL (Structured Query Language), que organiza os dados em tabelas, onde cada registro corresponde a uma linha específica contendo os campos definidos para cada tipo de informação. Essa estrutura permite o gerenciamento eficiente dos dados, garantindo

integridade, segurança e facilidade na manipulação e recuperação das informações necessárias para o funcionamento do aplicativo. O software foi desenvolvido para ser utilizado em dispositivos móveis (smartphones e tablets) sobre os sistemas operacionais Android e iOS.

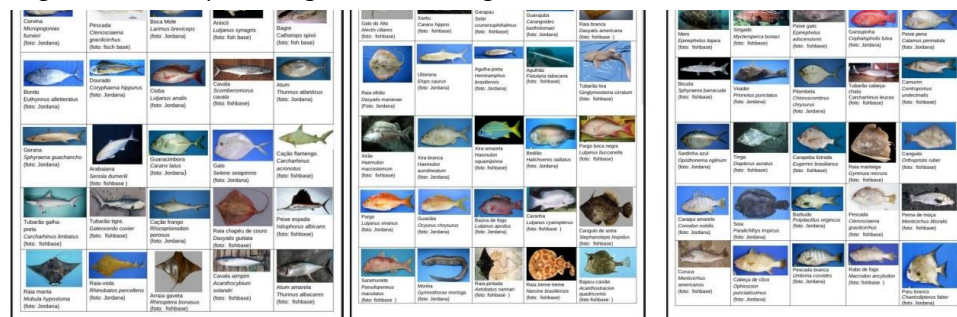
3. RESULTADOS

A identificação das funcionalidades do aplicativo Pescapp teve início com entrevistas estruturadas com pescadores artesanais das comunidades costeiras, permitindo compreender as necessidades reais da atividade e os tipos de informações mais relevantes para a gestão da pesca. Durante esse processo, foram mapeadas as variáveis essenciais para coleta de dados, como espécies capturadas, tipos de artes de pesca utilizadas e ocorrência de resíduos plásticos nas redes. As entrevistas também forneceram insights sobre a interface desejada, prioridades de usabilidade e formas de apresentação das informações para facilitar o registro diário pelos pescadores.

Posteriormente, reuniões no Laboratório de Ecologia de Peixes e Pesca da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) com pesquisadores especializados, possibilitaram ajustes no protótipo, discutindo abordagens de apresentação, funcionalidades adicionais e critérios de validação científica das informações a serem registradas. A partir desses encontros, foi elaborada a estrutura inicial do aplicativo, com foco em atender simultaneamente às demandas dos pescadores e aos requisitos científicos para monitoramento ambiental e estatístico da pesca artesanal.

O desenvolvimento do aplicativo foi realizado inicialmente em uma plataforma no-code, a fim de permitir a criação rápida e iterativa do protótipo. Posteriormente, o projeto evoluiu para uma implementação em código, conduzida por técnico especializado, utilizando um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) compatível com aplicações multiplataforma. Esse processo incluiu a construção de um banco de dados abrangente, contendo informações sobre as espécies capturadas: fotos, nomes populares e científicos, distribuídos de forma a facilitar a consulta durante o registro das atividades pesqueiras.

As imagens das espécies foram obtidas de diversas fontes confiáveis: fotografias de trabalhos anteriores dos autores, imagens cedidas por especialistas da UFAL com experiência em fotografia subaquática, e o banco de dados FishBase (figura 1). Para representar visualmente as artes de pesca mais utilizadas, que não possuíam registros fotográficos suficientes, foram geradas imagens animadas por inteligência artificial, garantindo consistência e clareza na interface



do aplicativo.

Figura 1. Fotos, nomes científicos e populares dos peixes utilizados no PescApp.

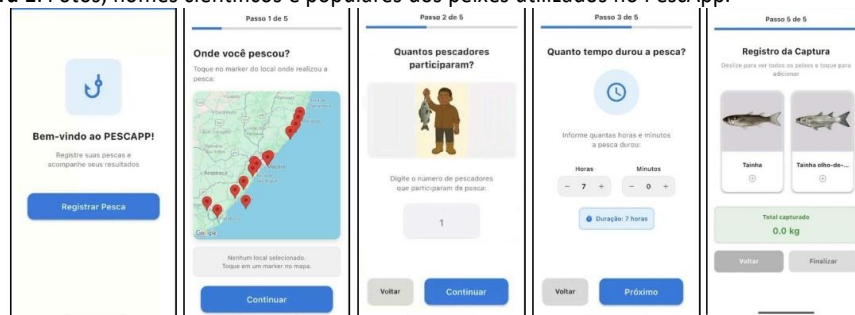


Figura 2. Exemplos de telas do PescApp, mostrando abas de registro de local de pesca, número de Pescadores por viagem de pesca, quantidade de horas da pescaria e espécies capturas com peso.

O Pescapp, portanto, integra a coleta de dados de desembarques pesqueiros, registro de captura de espécies e incidência de plásticos, permitindo a geração de relatórios periódicos detalhados e oferecendo uma ferramenta de gestão participativa e informada (figura 2). A

construção do banco de dados incluiu ainda a atribuição de tokens únicos para cada espécie, facilitando a organização e posterior análise das informações coletadas.

4. DISCUSSION

O PescApp representa uma ferramenta inovadora para integrar tecnologias móveis ao monitoramento da pesca artesanal, alinhando-se às tendências globais de digitalização do setor. A utilização de smartphones na pesca tem se expandido mundialmente, oferecendo funcionalidades que vão desde coleta de dados até monitoramento ambiental e suporte a cadeias de valor (Smith *et al.*, 2020) [22]. Aplicativos móveis têm se mostrado eficazes tanto em grandes frotas comerciais quanto em pescarias de pequena escala, permitindo a substituição de múltiplos dispositivos e a centralização das informações em plataformas acessíveis (Smith *et al.*, 2020) [22].

No contexto brasileiro, a necessidade de soluções digitais é ainda mais evidente devido à dimensão territorial e à dispersão geográfica das comunidades pesqueiras. Com mais de 7 milhões de km² de território continental e uma extensa zona costeira, a coleta de dados sistemática é logisticamente desafiadora, especialmente para a pesca artesanal, que representa cerca de 50% da produção pesqueira nacional (FAO, 2022) [1]. Ferramentas como o PescApp podem atuar como catalisadores para preencher essa lacuna, viabilizando o registro em tempo real de desembarques e a geração de indicadores confiáveis sobre espécies e esforços de pesca, complementando políticas públicas de manejo sustentável.

A experiência de monitoramento comunitário em outras regiões, como o caso da Amazônia brasileira, evidencia que pescadores podem fornecer dados precisos e de baixo custo, comparáveis aos obtidos por agências governamentais, quando apoiados por tecnologias acessíveis (Castello *et al.*, 2015) [23]. Assim, o PescApp segue uma abordagem similar, integrando o conhecimento ecológico local (LEK) às demandas científicas e administrativas. O envolvimento direto das comunidades pesqueiras garante maior aderência e sustentabilidade do uso do aplicativo, promovendo uma gestão participativa e informada.

Além disso, a inclusão do registro de plásticos capturados nas redes é um diferencial relevante. Microplásticos e macroplásticos representam uma ameaça crescente aos ecossistemas marinhos e à segurança alimentar, bioacumulando ao longo da cadeia trófica e impactando espécies comercialmente importantes (Lusher *et al.*, 2017) [24]. Embora a presença de plástico nos oceanos seja bem documentada, o monitoramento específico durante atividades pesqueiras ainda é escasso, especialmente em pequenas pescarias costeiras. Assim, o PescApp não apenas coleta dados sobre capturas, mas também fornece informações inéditas sobre resíduos plásticos, permitindo intervenções mais direcionadas e políticas de mitigação baseadas em evidências.

O futuro da pesca sustentável passa pelo uso de tecnologias inteligentes, como Internet das Coisas (IoT) e Inteligência Artificial (AI), que possibilitam monitoramento ambiental em tempo real, otimização do esforço de pesca e redução de impactos negativos (Sánchez *et al.*, 2021) [25]. O PescApp, ao integrar funcionalidades de registro digital e análise de dados, se alinha a essa tendência, oferecendo uma plataforma escalável e potencialmente integrável com sistemas de monitoramento mais avançados, como sensores IoT para qualidade ambiental e rastreamento de espécies.

Por fim, a experiência adquirida no desenvolvimento do PescApp destaca a importância de ferramentas acessíveis, adaptáveis e co-criadas com os usuários finais. A combinação de design centrado no usuário, integração de imagens científicas confiáveis e recursos interativos demonstra que soluções digitais podem superar barreiras tradicionais de coleta de dados, promovendo ciência cidadã e contribuindo para a conservação e manejo sustentável da pesca artesanal.

Financiamento: Este trabalho faz parte do Projeto Ecológico de Longa Duração - Costa dos Corais, Alagoas (PELD-CCAL) do projeto Long-Term Ecological Research – Brasil, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – (nº 441657/2020-0 e nº 442237/2024-6), FAPEAL - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (nº PLD2021010000001).

Declaração do Conselho de Revisão Institucional: O estudo foi conduzido de acordo com as normas éticas do Comitê Nacional de Ética em Pesquisa e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa do Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde, por meio da Plataforma Brasil, CAAE 47595621.2.0000.5013, intitulado “PELD-APA Costa dos Corais-AL (PELD-CCAL) Fase 2: Resiliência socioecológica e capacidade adaptativa da APA Costa dos Corais”.

Declaração de Consentimento Informado: Foi obtido o consentimento informado de todos os participantes do estudo para participação nas entrevistas e para a utilização das informações coletadas no desenvolvimento do aplicativo PescApp.

Agradecimentos: Os autores agradecem à professora Nidia Noemi Fabré, da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), pelo apoio na definição das variáveis essenciais do PescApp e pela contribuição à concepção da ideia do aplicativo. Agradecem também ao Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração (PELD) por fazer parte de suas atividades e ao Instituto Federal de Alagoas (IFAL) por aprovar o financiamento deste projeto junto à FAPEAL. Por fim, agradecem ao professor Ricardo Ribeiro, do IFAL, pelo suporte durante a execução do projeto.

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse. Os financiadores não tiveram qualquer papel no delineamento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito; ou na decisão de publicar os resultados.

REFERÊNCIAS

1. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation. Rome: FAO, jul. 2022. v. 1, n. 1, p. 1–266. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cc0461en/cc0461en.pdf>.
2. GOLDEN, Christopher et al. Aquatic foods to nourish nations. *Nature*, v. 598, n. 7880, p. 315–320, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03917-1>.
3. HILBORN, Ray et al. Effective fisheries management instrumental in improving fish stock status. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, Washington, DC, v. 117, e. 4, p. 2218–2224, jan. 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31932439>
4. BATISTA, Vandick et al. Tropical Artisanal Coastal Fisheries: Challenges and Future Directions. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, Reino Unido, v. 22, p. 1–15, 2014. Disponível em: <https://search.app/qcNdxFYbCAtpE7xK7>.
5. MPA Ministério da Pesca e Aquicultura. Boletim estatístico da pesca e aquicultura: Brasil, 2008–2009. Brasília, DF: MPA, 2011. 99 p. Disponível em: <https://search.app/pjCZAtPBvmiAyZ5a6>.
6. RANGELY, Jordana, et al. Assessing interspecific variation in life-history traits of three sympatric tropical mullets using age, growth, and otolith allometry. *Fisheries Research*. Amsterdã, Países Baixos, v. 260, n. 106577, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106577>.
7. FERREIRA, Helen Roberta Silva et al. Caracterização da pesca com rede serreira no município de Raposa-MA = Characterization of fishing with drift gillnet in the municipality of Raposa-MA. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, v. 31, n. 2, 27 dez. 2021. Disponível em: <https://periodicoeletronicos.ufma.br/index.php/blabohidro/article/view/13646>
8. RUFFINO, Mauro. Status and trends of the fishery resources of the Amazon Basin in Brazil. Roma: FAO Fisheries and Aquaculture, jan. 2014. Disponível em: <https://search.app/DqcEXMymVeTVBrne6>.
9. DAVIS, Ruth; HANICH, Quentin. Transparency in fisheries conservation and management measures. *Marine Policy*, Austrália, v. 136, n. 104088, p. 1–6, jun. 2020. Disponível em: <https://search.app/TX5BJKGfEyoBYccj9>
10. FONTELES, Francisco; FREITAS, Leandro; ESPÍNDOLA, Jonatas. Engenharia de Pesca: o avanço da ciência no Brasil. Pará: UFPA, abr. 2023. Disponível em: <https://search.app/JDp2wnu2dNFSQ5Zp7>
11. DÓRIA, Carolina et al. Review of Fisheries Resource Use and Status in the Madeira River Basin (Brazil, Bolivia, and Peru) Before Hydroelectric Dam Completion. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, Taylor & Francis, v. 26, n. 4, p. 494–514, mai. 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23308249.2018.1463511>
12. RANGELY, Jordana et al. Estratégias de pesca artesanal no litoral marinho alagoano (Brasil). *Boletim do Instituto de Pesca*, Brasil, v. 36, n. 4, p. 263–275, 2010. Disponível em: <https://search.app/eidXcGrssFQwoFbk8>
13. ICMBIO. Plano de manejo da Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais. Tamandaré: ICMBio, 2013. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/apacostadoscorais/destaques/132-revisao-do-plano-de-manejo.html>
14. PELD APACC. Disponível em: <https://sites.google.com/view/peld-costa-dos-corais-al/>. Acesso em: 21 jul. 2024.
15. BORRELLE, Sarah B. et al. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science*, v. 369, n. 6510, p. 1515–1518, sep. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aba3656>
16. KÜHN, Silvia; VAN FRANEKER, Jan A.; THIEL, Martin. Marine litter is everywhere: impacts and solutions. *Marine Pollution Bulletin*, v. 99, n. 1–2, p. 1–3, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.022>
17. ROCHMAN, Chelsea M. et al. The ecological impacts of plastic pollution on marine wildlife: Current knowledge and future research needs. *Science of The Total Environment*, v. 667, p. 1071–1083, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.057>
18. DANTAS, Vanda Maria Campos Salmeron. Nas marés da vida: histórias e saberes das mulheres marisqueiras. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em: <https://search.app/Kti4UkiknpSwF2n79>
19. GABOR, Manuela Rozalia. Non-probabilistic sampling use in qualitative marketing research: Haphazard sampling. Volunteer sampling. *The Annals of Oradea University*, Tome XVI, Volume II, p. 954–958, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Manuela-Rozalia-Gabor/publication/260284359>
20. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation. Rome: FAO, jul. 2022. v. 1, n. 1, p. 1–266. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cc0461en/cc0461en.pdf>.
21. GOLDEN, Christopher et al. Aquatic foods to nourish nations. *Nature*, v. 598, n. 7880, p. 315–320, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03917-1>.

22. HILBORN, Ray et al. Effective fisheries management instrumental in improving fish stock status. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, Washington, DC, v. 117, e. 4, p. 2218–2224, jan. 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31932439>
23. BATISTA, Vandick et al. Tropical Artisanal Coastal Fisheries: Challenges and Future Directions. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, Reino Unido, v. 22, p. 1–15, 2014. Disponível em: <https://search.app/qcNdxFYbCAtpE7xK7>.
24. MPA Ministério da Pesca e Aquicultura. Boletim estatístico da pesca e aquicultura: Brasil, 2008–2009. Brasília, DF: MPA, 2011. 99 p. Disponível em: <https://search.app/pJCZAtpBvmiAyZ5a6>.
25. RANGELY, Jordana, et al. Assessing interspecific variation in life-history traits of three sympatric tropical mullets using age, growth, and otolith allometry. *Fisheries Research*. Amsterdã, Países Baixos, v. 260, n. 106577, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106577>.
26. FERREIRA, Helen Roberta Silva et al. Caracterização da pesca com rede serreira no município de Raposa-MA = Characterization of fishing with drift gillnet in the municipality of Raposa-MA. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, v. 31, n. 2, 27 dez. 2021. Disponível em: <https://periodicos.eletronicos.ufma.br/index.php/blabohidro/article/view/13646>
27. RUFFINO, Mauro. Status and trends of the fishery resources of the Amazon Basin in Brazil. Roma: FAO Fisheries and Aquaculture, jan. 2014. Disponível em: <https://search.app/DqcEXMymVeTVBrne6>.
28. DAVIS, Ruth; HANICH, Quentin. Transparency in fisheries conservation and management measures. *Marine Policy*, Austrália, v. 136, n. 104088, p. 1–6, jun. 2020. Disponível em: <https://search.app/TX5BJKGfEyoBYccJ9>
29. FONTELES, Francisco; FREITAS, Leandro; ESPÍNDOLA, Jonatas. Engenharia de Pesca: o avanço da ciência no Brasil. Pará: UFPA, abr. 2023. Disponível em: <https://search.app/JDp2wnu2dNFSQ5Zp7>
30. DÓRIA, Carolina et al. Review of Fisheries Resource Use and Status in the Madeira River Basin (Brazil, Bolivia, and Peru) Before Hydroelectric Dam Completion. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, Taylor & Francis, v. 26, n. 4, p. 494–514, mai. 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23308249.2018.1463511>
31. RANGELY, Jordana et al. Estratégias de pesca artesanal no litoral marinho alagoano (Brasil). *Boletim do Instituto de Pesca*, Brasil, v. 36, n. 4, p. 263–275, 2010. Disponível em: <https://search.app/eidXcGrssFQwoFbk8>
32. ICMBIO. Plano de manejo da Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais. Tamandaré: ICMBio, 2013. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/apacostadoscorais/destaques/132-revisao-do-plano-de-manejo.html>
33. PELD APACC. Disponível em: <https://sites.google.com/view/peld-costa-dos-corais-al/>. Acesso em: 21 jul. 2024.
34. BORRELLE, Sarah B. et al. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science*, v. 369, n. 6510, p. 1515–1518, sep. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aba3656>
35. KÜHN, Silvia; VAN FRANEKER, Jan A.; THIEL, Martin. Marine litter is everywhere: impacts and solutions. *Marine Pollution Bulletin*, v. 99, n. 1–2, p. 1–3, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.022>
36. ROCHMAN, Chelsea M. et al. The ecological impacts of plastic pollution on marine wildlife: Current knowledge and future research needs. *Science of The Total Environment*, v. 667, p. 1071–1083, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.057>
37. DANTAS, Vanda Maria Campos Salmeron. Nas marés da vida: histórias e saberes das mulheres marisqueiras. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em: <https://search.app/Kti4UkiknpSwF2n79>
38. GABOR, Manuela Rozalia. Non-probabilistic sampling use in qualitative marketing research: Haphazard sampling. Volunteer sampling. *The Annals of Oradea University*, Tome XVI, Volume II, p. 954–958, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Manuela-Rozalia-Gabor/publication/260284359>
39. MANZINI, E. J. Considerações sobre a elaboração de roteiro para entrevista semi-estruturada. In: MARQUEZINE, M. C.; ALMEIDA, M. A.; OMOTE, S. (Orgs.). *Colóquios sobre pesquisa em Educação Especial*. Londrina: Eduel, 2003. p. 11–25. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=2005&scioldt=0%2C5&cites=12097908604370099634
40. GARRETT, Jesse James. *The elements of user experience: user-centered design for the web*. Nova Iorque: New Riders, 2002. Disponível em: <https://search.app/FNB7AviHWvXxMpEC8>
41. SMITH, Hannah et al. Mobile technology in small-scale fisheries: improving data collection and management. *Fisheries Research*, v. 228, p. 105–117, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105117>
42. CASTELLO, L. et al. Lessons from community-based fisheries monitoring in the Amazon. *Ambio*, v. 44, p. 1–15, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0685-8>
43. LUSHER, A. et al. Microplastic pollution in the marine environment. *Marine1, A.B.; Author 2, C.D. Title of the article. *Abbreviated Journal Name* Year, Volume, page range.
44. SÁNCHEZ, M., et al. (2021). IoT and AI Applications in Fishing: Smart Fishing for Sustainable Practices. In: *Advances in Fisheries Technology*. Springer.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of IWPPPO Committee and/or the editor(s). The IWPPPO and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Time required for the complete degradation of microplastics in marine and terrestrial environments: influence of polymer type, shape, and weathering

IWLDSON G S SANTOS ^{1,*}, ISNALDO I BARBOSA ², ADALGIZA FORNARO ³, DANIEL C ZACHARIAS ⁴, MICEJANE S COSTA ⁵, and MARCOS F M FERREIRA ⁶

¹ UFAL, ICAT, LAMMA; iwldson@gmail.com

² UFAL, IM; isnaldo@pos.mat.ufal.br

³ USP, IAG; adalgiza.fornaro@iag.usp.br

⁴ USP, IAG; danizach@gmail.com

⁵ UFAL, ICAT, LAMMA; micejane@yahoo.com.br

⁶ UFAL, IQM; marcos.ferreira@iqb.ufal.br

* Correspondence: iwldson@gmail.com; Tel.: (82)988133971

Abstract: The presence of microplastics in marine and terrestrial environments poses a serious threat to oceanic life and, consequently, to human health. However, understanding their persistence and lifespan in natural settings remains a major challenge for both the scientific community and policymakers. This study investigates the time required for the complete degradation of microplastics in marine and terrestrial environments. The analyzed polymers included high-density polyethylene (HDPE), low-density polyethylene (LDPE), polypropylene (PP), and the biodegradable polymer polylactic acid (PLA), considering particle morphology represented by regular shapes (cube, sphere, cylinder, octahedron, icosahedron, dodecahedron, and tetrahedron), with and without degradation accelerators. The results indicate that the maximum degradation time (td) is directly proportional to the initial volume of the microplastic and inversely proportional to its specific surface degradation rate (SSDR). Octahedron-shaped particles exhibited the shortest td due to their smaller volume, while cylindrical particles presented the longest. Among the polymers, PP showed the longest decomposition time (1,334–13,864 years) due to its lower SSDR, whereas PLA degraded more rapidly, within 2–22 years, especially in terrestrial environments with degradation accelerators. These findings provide valuable insights for public management, supporting decision-making processes and strengthening strategies for monitoring microplastics in oceans.

Keywords: Marine pollution; Waste management; Socioeconomic variables; Wavelet coherence; Brazil

1. INTRODUCTION

Currently, approximately 400 megatons of plastic waste are produced annually worldwide. The accumulation of plastics in the environment is rapidly increasing, and the understanding of the persistence and longevity of these fragments in marine and terrestrial environments remains highly limited. Global plastic waste pollution has been increasing alongside demand since plastic products gained commercial popularity in the 1930s. The introduction of plastics into ecosystems occurs through various mechanisms, including improper solid waste disposal and wastewater discharge. Microplastic particles (MPs) are generated through the degradation and fragmentation of polymers [2-3].

According to [2], plastics can be classified as Macro ($r \geq 25 \text{ mm}$), Meso ($5 \text{ mm} \leq r < 25 \text{ mm}$), Micro ($1 \mu\text{m} \leq r < 5 \text{ mm}$), and Nano ($r < 1 \mu\text{m}$). These plastics are virtually ubiquitous in soil, oceans and air, and are subject to long-distance transport. Understanding the degradation and fragmentation mechanisms of plastics in different environments (land, freshwater, estuaries, mangroves and oceans) can help bridge the knowledge gap regarding the formation pathway and fate of microplastics. The most commonly improperly disposed plastics in the environment are widely used polymers, such as high-density polyethylene (HDPE) and low-density polyethylene (LDPE), polyethylene terephthalate (PET), polyvinyl chloride (PVC), polystyrene (PS), polypropylene (PP), polyurethane (PU) and biodegradable plastics, for example polylactic acid (PLA) [4-5].

The degradation factors of microplastics can be classified as intrinsic, related to the microplastic itself (chemical composition and structure, polymer type, presence of additives, crystallinity, color, thickness and density), or extrinsic, related to the environment and divided into physical (radiation, temperature, depth and mechanical action), chemical (oxygenation, oxidation,

salinity and chemical contaminants), biological (biofilms, microorganisms and biodegradability) and environment factors (water, soil and wind).

According to [6], the types of microplastic degradation that can occur in both marine and terrestrial environments are: (i) Photochemical, due to exposure to sunlight, primarily ultraviolet (UV) radiation; (ii) Thermal, caused by temperature changes, high temperatures accelerates chemical reactions; (iii) Biological, attributed to microbial and enzymatic activities, such as bacteria, fungi and algae; (iv) Mechanical, due to the physical impact of external forces resulting in abrasion caused by waves, sea currents, marine sediments, wind and friction with soil and other objects; (v) Oxidative, involving chemical reactions with oxygen, catalyzed by heat and the presence of light; (vi) Hydrolytic, occurring due to hydrostatic pressure when water molecules react with the chemical bonds of plastics. All these degradation types contribute to the breakdown of the polymer structure, weakening the material, leading to fragmentation and increasing the number of microplastics in ecosystems.

Plastics are believed to have a long lifespan, and there is still a lack of understanding regarding the long-term degradation mechanisms [7-9]. Considering the potential threats of microplastics to environmental ecological functions and risks to human health [10]. The primary objective of this research is to investigate the complete degradation time of microplastics (high-density polyethylene, low-density polyethylene, polypropylene, and polylactic acid) with different shapes (cube, sphere, and cylinder), using their respective specific surface degradation rates in marine and terrestrial environments, with and without the presence of weathering.

2. MATERIALS AND METHODS

In literature, the term degradation may encompass depolymerization, chemical modification, changes in physical properties, overall mass loss through any mechanism, or complete mineralization into CO₂ and H₂O. According to [3], the definition of the term degradation is restricted to the total mass loss of the original polymer fragment. The degradation rate of the polymer (r_d , kg s⁻¹) is defined as the differential mass loss per unit of time:

$$r_d \frac{-dm}{dt} = k \cdot A_s \quad (1)$$

Since degradation primarily occurs on exposed surfaces, we assume that the degradation rate is proportional to the surface area (A^2 , m²) and a constant rate (k , kg · s⁻¹ · m⁻²). The degradation rate used here depends solely on intrinsic properties. Let the surface degradation velocity (k_d , m · s⁻¹) can be defined as the ratio between the constant degradation rate (k) and the density (p , kg · m⁻³). Thus, we have:

$$k_d = \frac{k}{p} \leftrightarrow k = k_d \cdot p \quad (2)$$

Substituting Eq. (2) into Eq. (1), we obtain:

$$r_d = \frac{-dm}{dt} = k_d \cdot p \cdot A_s$$

The constant k_d becomes the specific surface degradation rate (SSDR), a linear rate that represents the perpendicular depth of plastic degraded per unit of time. Assuming the density and surface area are constant, integrating and rearranging Eq. (3) yields the following algebraic solutions for mass as a function of time and the maximum degradation time:

$$dm = -k_d \cdot p \cdot A_s \cdot dt$$

$$\int_{m_0}^{m_t} dm = -k_d \cdot p \cdot A_s \cdot \int_0^t dt$$

$$m_t - m_0 = -k_d \cdot p \cdot A_s \cdot t$$

Therefore, the mass as a function of time is given by:

$$m_t = m_0 - k_d \cdot p \cdot A_s \cdot t \quad (4)$$

The maximum degradation time (t_d) is when $m_t=0$, and it is given by:

$$0 = m_0 - k_d \cdot \rho \cdot A_s \cdot t_d$$

$$t_d = \frac{m_0}{k_d \cdot \rho \cdot A_s}$$

$$t_d = \frac{V_0}{k_d \cdot A_s} \quad (5)$$

The assumption of a constant surface area is not appropriate for the degradation of microplastics in natural environments. Consequently, the following algebraic solutions for mass as a function of time and the maximum degradation time of microplastics, considering cube, sphere, cylinder, octahedron, icosahedron, dodecahedron and tetrahedron shapes, are described in the link [1] and summarized in Table 1

Table 1. Microplastic formats include information on 3D images, surface area, volume, volume limits, mass and CDT - complete degradation time.

CDT (t_d , years)	Mass (m_t , kg)	Volume limite (m^3) $1 \cdot 10^{-6} \cdot m \leq r < 5 \cdot 10^{-3} \cdot r$	Volume (m^3)	Surface area (m^2)	3D image	Formats
$\frac{\sqrt[3]{V_0}}{2K_d}$	$(m_0^{\frac{1}{3}} - 2k_d \rho^{\frac{1}{3}} t)^3$	$1 \cdot 10^{-18} \leq V < 1.25 \cdot 10^{-18}$	r^3	$6r^2$		Cube
$\frac{3}{6^{\frac{2}{3}} K_d} \sqrt[3]{\frac{V_0}{\pi}}$	$(m_0^{\frac{1}{3}} - \frac{2}{3} k_d (\pi \rho)^{\frac{1}{3}} t)^3$	$4.19 \cdot 10^{-18} \leq V < 5.24 \cdot 10^{-18}$	$\frac{4}{3} \pi r^3$	$4\pi r^2$		Sphere
$\frac{1}{k_d} \sqrt[2]{\frac{V_0}{\pi h}}$	$(m_0^{\frac{1}{2}} - k_d (\pi \rho h)^{\frac{1}{2}} t)^2$	$3.14 \cdot 10^{-14} \leq V < 7.85 \cdot 10^{-14}$	$\pi h r^2$	$2\pi r h$		Cylinder
$\frac{\sqrt[3]{V_0}}{2^{\frac{2}{3}} \cdot 3^{\frac{1}{6}} K_d}$	$(m_0^{\frac{1}{3}} - 2^{\frac{2}{3}} \cdot 3^{\frac{1}{6}} k_d \rho^{\frac{1}{3}} t)^3$	$4.71 \cdot 10^{-19} \leq V < 5.89 \cdot 10^{-19}$	$\frac{2^{\frac{2}{3}}}{3} r^3$	$2 \cdot 3^{\frac{1}{2}} r^2$		Octahedron
$\frac{\sqrt[3]{V_0}}{(3 - \sqrt{5})^{\frac{2}{3}} 3^{\frac{1}{6}} 5^{\frac{1}{3}} K_d}$	$(m_0^{\frac{1}{3}} - 2^{-2} 5^{-\frac{2}{3}} (3 - \sqrt{5}) k_d \rho^{\frac{1}{3}} t)^3$	$2.18 \cdot 10^{-18} \leq V < 2.73 \cdot 10^{-18}$	$\frac{5(3 + 5^{\frac{1}{2}})}{12} r^3$	$\frac{3^{\frac{1}{2}}}{4} r^2$		Icosahedron
$\frac{\sqrt[3]{V_0}}{(\frac{7\sqrt{5}-15}{5})^{\frac{2}{3}} \sqrt{25+10} K_d}$	$(m_0^{\frac{1}{3}} - (\frac{7\sqrt{5}-15}{5})^{\frac{2}{3}} \sqrt{25+10} k_d \rho^{\frac{1}{3}} t)^3$	$7.66 \cdot 10^{-18} \leq V < 9.58 \cdot 10^{-18}$	$\frac{15 + 7\sqrt{5}}{4} r^3$	$3\sqrt{25+10} r^2$		Dodecahedron
$\frac{\sqrt[3]{V_0}}{2 \cdot 3^{\frac{1}{6}} K_d}$	$(m_0^{\frac{1}{3}} - 2 \cdot 3^{\frac{1}{6}} k_d \rho^{\frac{1}{3}} t)^3$	$1.18 \cdot 10^{-19} \leq V < 1.47 \cdot 10^{-19}$	$\frac{2^{\frac{1}{2}}}{12} r^3$	$3^{\frac{1}{2}} r^2$		Tetrahedron

* For cylinders with a large aspect ratio (i.e., radius is much smaller than the height $r \ll h$).

Therefore, the mass the the microplastic (m_t , kg) depends on the initial mass of the plastic (m_0 , kg), the specific surface degradation rate (SSDR, $k \cdot \text{year}^{-1}$), the material density (ρ , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), time (t , years), the number pi ($\pi \sim 3.141592$), and supposing height ($h=5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$), upper limit of microplastics. The maximum degradation time of microplastics in the natural environment (t_d , years), depends on the SSDR and the initial volume of the plastic (V , m^3), which in turn depends on the size limits of the microplastic, assumed to be ($1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \leq r \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$). In this study, the r represents the side length of the square, or the radius of the sphere, or the radius of the base of the cylinder, or others.

An important observation is that maximum degradation time is directly proportional to volume, meaning that a larger (smaller) initial volume results in a longer (shorter) t_d of the microplastics. Additionally, maximum degradation time is inversely proportional to specific surface degradation rate, as the SSDR increases (decreases), the t_d of the microplastic decreases (increases).

Table 2 presents four types of microplastics (HDPE, LDPE, PP, and PLA) along with key intrinsic information such as chemical and structural formulas, molecular orientation, density, specific surface degradation rate, and the half-life period of microplastics, with and without the presence of degradation accelerators. The degradation rate data, combined with the volumes of microplastics, will be used to construct graphs to determine the maximum periods of complete degradation of microplastics in both environments and compare them with the half-life period expressed in years.

Table 2. Four different types of microplastics including their intrinsic information. HDPE - high density polyethylene, LDPE - low density polyethylene, PP - polypropylene, PLA - acid polylactic, SSDR - Specific Surface Degradation Rate. Source: Adapted from [3] and [7].

Half-life (years)		SSDR ($\mu\text{m year}^{-1}$)		Half-life (years)		SSDR ($\mu\text{m year}^{-1}$)		Density ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Molecular orientation	Structural formula	Chemical formula	Name
Terrestrial	Marine	Terrestrial	Marine	Terrestrial	Marine	Terrestrial	Marine					
95 - 9000*	12 - 1100*	0.55 - 2.6*	4.5 - 22*	230 - 5500	23 to >2500	0.91 - 1.1	(0 - 11]	930-970	Semi-crystalline		(C ₂ H ₄)	HDPE
0.6 - 32*	4.2 - 5.5*	1.6 - 83*	9 - 12*	4.6	1.4 to >2500	11	(0 - 37]	910-940	Amorphous		(C ₂ H ₄)	LDPE
780*	87*	0.51*	4.6*	(-)**	53	(-)**	7.5	900-940	Semi-crystalline		(C ₃ H ₆)	PP
0.16*	0.29*	320*	180*	0.035 - 2.5	1.7 - 6.7	20 - 1400	7.5 - 29	1100-130	Semi-crystalline		(C ₃ H ₄)	PLA

*Corresponds to data collected in the presence of a degradation accelerant (e.g., UV pretreatment, thermal pretreatment, or microbial incubation) and/or plastics containing a rapidly degrading filler (e.g., starch, PLA, etc.).

**Entries shown as (-) correspond to conditions for which no published data were found.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results will be presented and discussed through graphs illustrating the behavior of the maximum degradation time as a function of the specific surface degradation rate (Table 1 and 2) and microplastic volume with different shapes (Table 1). Working in the marine and terrestrial environments, both with and without the presence of degradation accelerators, such as ultraviolet radiation, high temperatures, microbial activity and others. The four types of plastic analyzed were high density polyethylene, low density polyethylene, polypropylene and acid polylactic.

In Fig. 1 the x-axis represents the volume of microplastics (m^3). The y-axis represents the complete degradation time of the microplastics (years). In general, all the curves for both types and shapes of microplastics exhibited downward-facing concavity, which is characteristic of curves generated from cubic or square root functions. The morphology of microplastics showed a significant difference in td. The octahedron shape exhibited the shortest fragmentation periods due to its smaller volume ($4.71\cdot 10^{-19}\leq V\leq 5.89\cdot 10^{-8}$). The cylinder shape exhibited the longest degradation time due to its larger volume ($3,1416\cdot 10^{-14}\leq V\leq 7,8540 - 10^{-7}\text{m}^3$) – (Table 1).

Fig. 1A the td values were 7071 years found for HDPE and LDPE above the estimated half-life values of 23 and 1.4 to more than 2500 years, respectively. The maximum td values of the PP and PLA microplastics were 943 years, overestimating the estimated half-life values by 53 years and between 1.7 and 6.7 years, respectively. Therefore, the results of the complete degradation time of microplastics in the marine environment without the presence of a degradation accelerator found in this study overestimate the half-life values shown in Table 2.

Fig. 1B, only HDPE microplastics with cylindrical (7770 years) and dodecahedral (6118 years) shapes overestimated the estimated half-life range of 230 to 5500 years, while the remaining geometries were consistent with this timeframe. All shapes of LDPE and PLA microplastics resulted in complete degradation times that exceeded the estimated half-lives of 4.6 years and between 0.035 and 2.5 years, respectively. Table 2 did not report the SSDR of PP, Chamas et al. (2020) reported that this value is not yet available in scientific literature.

Fig. 1C, the presence of weathering increased the specific surface degradation rate only for PLA ($k_d=180\text{ m}\cdot\text{year}^{-1}$), resulting in short maximum degradation periods ranging from 4 to 39 years. The maximum degradation time of HDPE with spherical (1111 years), dodecahedral (1237 years) and cylindrical (1571 years) shapes overestimated the estimated half-life range of 12 to 1100 years, while the remaining shapes were consistent with this timeframe. All remaining microplastics exhibited maximum degradation times that overestimated the half-life values presented in Table 2.

Fig. 1D, the presence of weathering expanded the range of the specific surface degradation rate for HDPE and LDPE microplastics, regarding SSDR of these microplastics in the terrestrial environment without weathering. PP ($k_d = 0.51\mu\text{m} \cdot \text{year}^{-1}$) exhibited one of the lowest rates, consequently exhibited one of the longest maximum degradation periods among the analyzed microplastic types. In contrast, PLA showed one of the highest SSDR, as a result presented one of

the shortest maximum degradation periods. Notably, SSDR with values close to zero, results in a prolonged time for complete degradation. The longest complete degradation time was of PP microplastics, which ranged from 1,334 to 13,864 years.

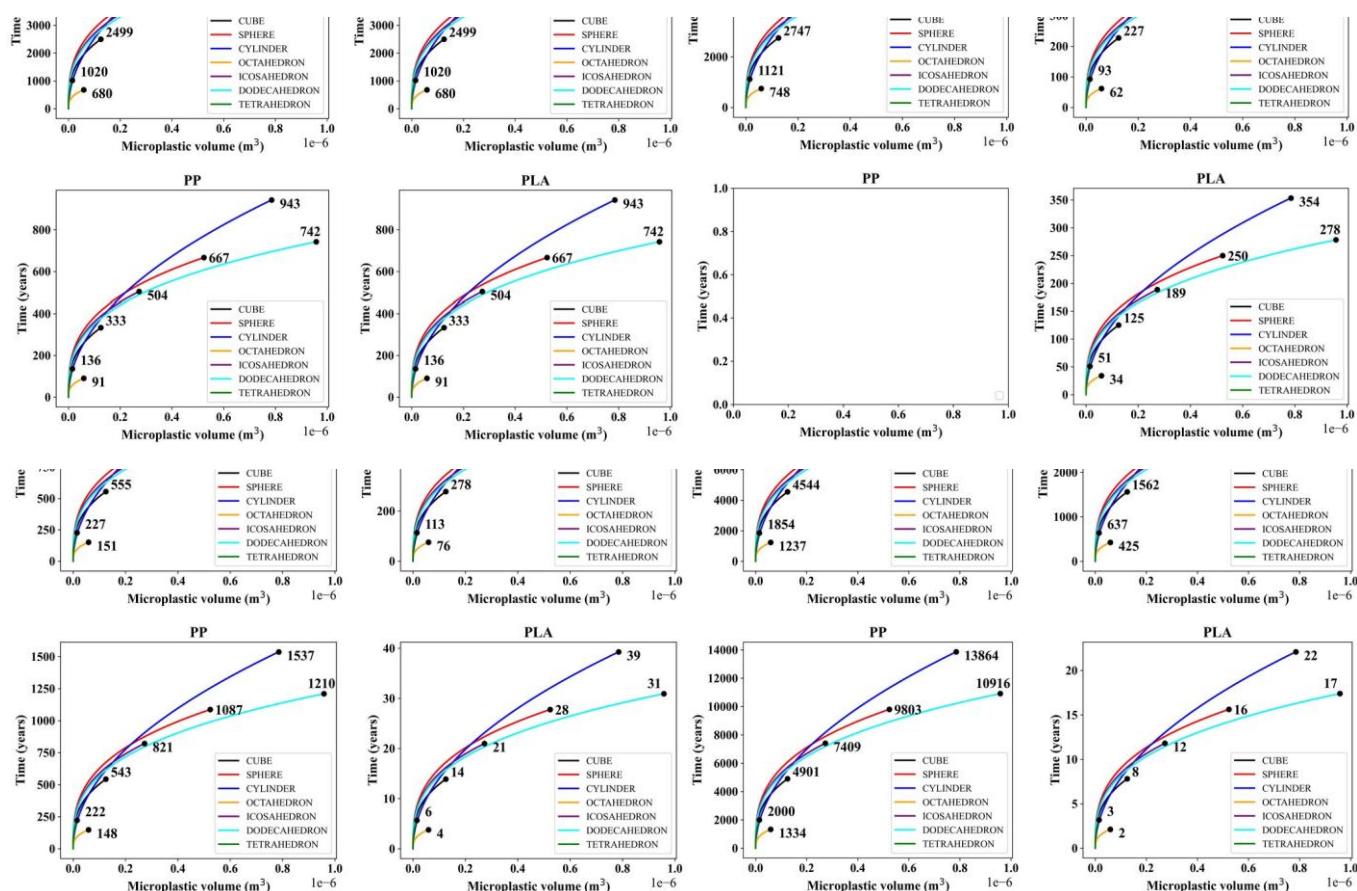


Figure 1. Complete degradation time as a function of the microplastics volume HDPE, LDPE, PP, and PLA. (A) Marine environment without degradation accelerator. (B) Terrestrial without degradation accelerator. (C) Marine environment with degradation accelerator. (D) Terrestrial environment with degradation accelerator.

After evaluating Figures 1 (A, B, C, D) and comparing the half-life values in Table 2, it is observed that the presence of degradation accelerators indicated an increase in the specific surface degradation rate of the microplastics HDPE for both environments, PLA for only marine environments and LDPE for only terrestrial environments. The presence of degradation accelerators indicated a decrease in the SSDR of the PP and LDPE microplastics only in marine environments.

According to [4], water dissipates heat more effectively and has a lower temperature than land. Consequently, the degradation rate in the presence of weathering in aquatic environments is greater than in terrestrial environments. However, the results found in this study do not fully align with this statement. For instance, the SSDR of HDPE microplastics in the marine environment are greater than in terrestrial environments. In contrast, the SSDR of LDPE and PLA in marine are shorter than in terrestrial and can be seen in Table 2 and figures 1.

4. CONCLUSIONS

Millions of plastic tons are produced worldwide, with a significant portion of this waste persisting in ecosystems for many years. The fragmentation of plastics into smaller pieces, such as microplastics, represents one of the stages in their degradation process, further accumulating debris in marine and terrestrial environments. Consequently, this study successfully investigated the persistence period of these plastic residues.

The complete degradation time of microplastics in different shapes at marine and terrestrial environments with and without the presence of degradation accelerators was evaluated. The results showed that the decomposition period is directly proportional to the initial volume of the microplastic and inversely proportional to its specific surface degradation rate. In general, microplastics with an octahedral shape exhibited the shortest degradation times due to their reduced volume, while cylindrical forms demonstrated prolonged degradation periods due to their larger volume. The presence of degradation accelerators does not indicate a significant increase in the specific surface degradation rate for all polymers.

The results showed that PP microplastics exhibited the longest maximum degradation time (13864 years) in the terrestrial environment with presence of degradation accelerators, due to their lowest specific surface degradation rates. HDPE and LDPE microplastics also took a long time to completely degrade. In contrast, biodegradable PLA microplastics, which exhibited a high degradation rate, subsequently had the shortest complete fragmentation period. The results of this study does not guarantee that the degradation rate under weather conditions in aquatic environments is greater than in terrestrial environments.

Finally, although this study focused on microplastics, the proposed methodology may also be applicable to Macro-, Meso-, and Nanoplastics. The complete degradation time of polymers such as PET, PVC, PS, PU, and other biodegradable plastics was not analyzed, because their specific surface degradation rates have not yet been established in the scientific literature. Once these rates are identified, the scope of the results can be broadened to estimate the maximum degradation time of these materials. Such developments would improve the accuracy of predictive models and inform more effective strategies for managing plastic pollution in marine environments. These results may also support public policymakers in decision-making and in the monitoring of plastic waste across diverse environmental contexts.

Acknowledgments: I would like to thank UFAL, UFCG, USP, IM, ICAT, UACA, IAG, CAPES, CNPQ and FAPESP for their institutional and financial support. Thanks God, family, teachers and friends.

REFERENCES

1. Algebraic Solutions, 2025. Available at: https://docs.google.com/document/d/1e8uLJi4kh9CQJEdWShfPHst4OMV6AL_8lfAWfBbNPw/edit?tab=t.0 (accessed 14 April 2025).
2. Arienzo, M., Ferrara, L., Trifuoggi, M., 2021. Research progress in transfer, accumulation and effects of microplastics in the oceans. *J. Mar. Sci. Eng.* 9, 433. <https://doi.org/10.3390/jmse9040433>
3. Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J.H., Abu-Omar, M., Scott, S.L., Suh, S., 2020. Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 8, 3494–3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
4. Duan, J., Bolan, N., Li, Y., Ding, S., Atugoda, T., Vithanage, M., Sarkar, B., Tsang, D.C.W., Kirkham, M.B., 2021. Weathering of microplastics and interaction with other coexisting constituents in terrestrial and aquatic environments. *Water Res.* 196, 117011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117011>
5. Ghanadi, M., Padhye, L.P., 2024. Revealing the long-term impact of photodegradation and fragmentation on HDPE in the marine environment: Origins of microplastics and dissolved organics. *J. Hazard. Mater.* 465, 133509. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133509>
6. Oluwoye, I., Machuca, L.L., Higgins, S., Suh, S., Galloway, T.S., Halley, P., Tanaka, S., Iannuzzi, M., 2023. Degradation and lifetime prediction of plastics in subsea and offshore infrastructures. *Sci. Total Environ.* 904, 166719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166719>
7. Sipe, J.M., Bossa, N., Berger, W., Windheim, N.V., Gall, K., Wiesner, M.R., 2022. From bottle to microplastics: Can we estimate how our plastic products are breaking down? *Sci. Total Environ.* 814, 152460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152460>
8. Webb, H.K., Arnott, J., Crawford, R.J., Ivanova, E.P., 2013. Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate). *Polymers* 5, 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym5010001>
9. Zhang, S., Wang, J., Yan, P., Hao, X., Xu, B., Wang, W., Aurangzeib, M., 2021. Non-biodegradable microplastics in soils: A brief review and challenge. *J. Hazard. Mater.* 409, 124525. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124525>
10. Zhang, X., Peng, X., 2022. How long for plastics to decompose in the deep sea? *Geochem. Persp. Lett.* 22, 20–25. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.2222>
11. Algebraic Solutions, 2025. Available at: https://docs.google.com/document/d/1e8uLJi4kh9CQJEdWShfPHst4OMV6AL_8lfAWfBbNPw/edit?tab=t.0 (accessed 14 April 2025).

12. Arienzo, M., Ferrara, L., Trifuoggi, M., 2021. Research progress in transfer, accumulation and effects of microplastics in the oceans. *J. Mar. Sci. Eng.* 9, 433. <https://doi.org/10.3390/jmse9040433>
13. Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J.H., Abu-Omar, M., Scott, S.L., Suh, S., 2020. Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 8, 3494–3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
14. Duan, J., Bolan, N., Li, Y., Ding, S., Atugoda, T., Vithanage, M., Sarkar, B., Tsang, D.C.W., Kirkham, M.B., 2021. Weathering of microplastics and interaction with other coexisting constituents in terrestrial and aquatic environments. *Water Res.* 196, 117011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117011>
15. Ghanadi, M., Padhye, L.P., 2024. Revealing the long-term impact of photodegradation and fragmentation on HDPE in the marine environment: Origins of microplastics and dissolved organics. *J. Hazard. Mater.* 465, 133509. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133509>
16. Oluwoye, I., Machuca, L.L., Higgins, S., Suh, S., Galloway, T.S., Halley, P., Tanaka, S., Iannuzzi, M., 2023. Degradation and lifetime prediction of plastics in subsea and offshore infrastructures. *Sci. Total Environ.* 904, 166719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166719>
17. Sipe, J.M., Bossa, N., Berger, W., Windheim, N.V., Gall, K., Wiesner, M.R., 2022. From bottle to microplastics: Can we estimate how our plastic products are breaking down? *Sci. Total Environ.* 814, 152460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152460>
18. Webb, H.K., Arnott, J., Crawford, R.J., Ivanova, E.P., 2013. Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate). *Polymers* 5, 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym5010001>
19. Zhang, S., Wang, J., Yan, P., Hao, X., Xu, B., Wang, W., Aurangzeib, M., 2021. Non-biodegradable microplastics in soils: A brief review and challenge. *J. Hazard. Mater.* 409, 124525. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124525>
20. Zhang, X., Peng, X., 2022. How long for plastics to decompose in the deep sea? *Geochem. Persp. Let.* 22, 20–25. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.2222>

Tipificação dos detritos plásticos encontrados nas carcaças de tartarugas verdes (*Chelonia mydas*) no litoral brasileiro: revisão de literatura

João Acioli ¹, Yasmin Santos ¹, Kauan Santos¹, Larissa Asevedo ¹, Elisangela Leandro ² and Vitória Sandes ^{3*}

¹ Discente de Medicina Veterinária do Cesmac; 2219875204@academico.cesmac.edu.br

² Discente de História da Ufal; elisangela.leandro@ichca.ufal.br

³ Docente de Medicina Veterinária do Cesmac; vitoria.sandes@cesmac.edu.br

Abstract: Nas últimas décadas, a ingestão de detritos plásticos pela fauna marinha tem sido amplamente estudada, destacando-se como uma ameaça crescente à sustentabilidade dos ecossistemas. Entre os vertebrados mais impactados estão as tartarugas marinhas, especialmente a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*), que, devido à sua longevidade e padrões migratórios amplos, funciona como bioindicador da poluição marinha. Este estudo revisou a literatura recente (2020–2025) sobre plásticos encontrados no trato gastrointestinal de tartarugas verdes no litoral brasileiro. Foram selecionados quatro artigos que detalham tipos e cores de detritos plásticos ingeridos, totalizando 1.054 carcaças, das quais 684 (64,9%) continham plástico. Ao todo, foram contabilizados 7.465 itens antrópicos, com média de 10,44 itens por animal. Os detritos foram classificados em formatos como plástico em folha, rígido, fios, canudos, entre outros, sendo predominantes plásticos em folha e rígidos. Quanto à coloração, a maioria dos itens apresentava cores semelhantes a algas e alimentos naturais, sugerindo indução à ingestão. Os impactos físicos da ingestão incluem obstruções gastrointestinais, lacerações e enterites, comprometendo a saúde das tartarugas e, consequentemente, a dinâmica dos ecossistemas.

Keywords: tartaruga verde 1; ingestão de plástico 2; poluição 3.

1. INTRODUCTION

Nas últimas décadas, houve um aumento no número de estudos que investigam a ingestão de detritos antrópicos pela fauna marinha. Muitos desses estudos concluíram que o lixo, particularmente os plásticos, representa uma ameaça significativa à sustentabilidade dos ecossistemas[1]. Os detritos plásticos em ambientes marinhos representam uma pressão antrópica global que, apesar do aumento da conscientização e das regulamentações preventivas, tende a continuar crescendo no futuro próximo. Anualmente, entre 4 e 12 milhões de toneladas de resíduos plásticos provenientes da terra e 1–2 milhões de toneladas oriundas dos rios chegam ao mar, tornando os itens plásticos e as partículas de microplástico presentes nos oceanos globais [2].

O plástico oriundo de atividades antropogênicas tornou-se um dos principais constituintes dos detritos marinhos, cujas principais fontes são a pesca, os itens industriais e de consumo. Devido ao seu potencial de dispersão e baixa taxa de degradação, o plástico rapidamente virou uma ameaça global aos ecossistemas marinhos. Pelo menos 700 espécies de seres vivos foram registradas ingerindo plástico em ambientes marinhos. Entre essas espécies estão as sete espécies existentes de tartarugas marinhas, frequentemente considerados o grupo de vertebrados mais vulnerável aos impactos da poluição por plástico[2-4].

A tartaruga-verde, *Chelonia mydas* (Linnaeus, 1758), possui diversas características, como longevidade e amplos padrões migratórios, que a tornam um bioindicador adequado da poluição marinha e da saúde humana [5]. As tartarugas marinhas, que habitualmente ocupam ambientes pelágicos, apresentam padrões reprodutivos migratórios caracterizados pelo deslocamento entre áreas de forrageamento e de nidificação. Esse comportamento migratório confere elevado potencial de dispersão espacial às espécies, mas, simultaneamente, amplia sua exposição a diferentes ambientes.

Esse comportamento migratório confere elevado potencial de dispersão espacial às espécies, mas, simultaneamente, amplia sua exposição a diferentes ambientes. Como consequência, esses animais tornam-se altamente vulneráveis ao contato com áreas contaminadas, o que aumenta significativamente os riscos associados à poluição marinha [6,7].

Segundo o estudo de [8], foi constatado que as tartarugas marinhas foram o principal grupo impactado pela ingestão de poluição por resíduos sólidos em que as espécies onívoras, como a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) e a tartaruga-oliva (*Lepidochelys olivacea*), apresentaram maior frequência de ingestão de plástico, linhas de pesca, nylon, anzóis, borracha, tecidos, isopor, alumínio e resíduos não identificados ao longo da costa sudeste do Brasil.

Os efeitos físicos da ingestão de plásticos causam uma variedade de consequências letais e subletais. Os detritos ingeridos bloqueiam, danificam ou reduzem o volume do sistema digestivo, causando obstruções gastrointestinais, lacerações, enterites em uma tartaruga [2,10,11].

As tartarugas verdes (*Chelonia mydas*) são espécies ameaçadas e desempenham papel-chave nos ecossistemas marinhos, como controle de populações de algas e manutenção de habitats costeiros. A ingestão de detritos plásticos pode comprometer sua saúde e afetar a dinâmica dos ecossistemas, portanto identificar os tipos de detritos plásticos ingeridos permite compreender padrões de exposição, fontes potenciais de poluição e impactos específicos de cada tipo de plástico, auxiliando em estratégias de mitigação ambiental.

2. MATERIALS AND METHODS

Este estudo consiste em classificar os tipos de plástico encontrados no trato gastrointestinal de tartarugas verdes (*Chelonia mydas*) no litoral brasileiro. Foram utilizadas as bases de dados PubMed, Elsevier, periódicos CAPES, Scielo e Scopus, com as palavras chave "*Chelonia mydas*", "pollution", "debris", "plastic", "Brazil", "ingest".

Os critérios de inclusão, artigos que especificam a tartaruga verde, estão incluídos na faixa de tempo entre 2020-2025, arquivos que detalham o tipo de detrito plástico encontrado, artigos que especificam território brasileiro. Os critérios de exclusão, o artigo ser anterior a 2020, especificar outra espécie de tartaruga, não apresentar o total de itens antrópicos encontrados, não apresentar os tipos de material e/ou cor dos itens, está relacionado a um local que não seja o Brasil.

A extração e compilação de dados foram realizadas por dois revisores, sem divergências de interesse durante a elaboração do artigo, juntamente com a unanimidade de concordância com a publicação do mesmo.

Devido esta pesquisa não envolver diretamente animais, não foi necessária a obtenção de aprovação ética para ser elaborada. Os estudos incluídos cumpriam as normas nacionais de bem-estar animal, conforme relatado pelos autores.

3. RESULTS

Foram encontrados no total 45 artigos utilizando as palavras chave "*Chelonia mydas*", "Ingest", "plastic". Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão houveram 4 artigos que permaneceram (Table 1). O número total de carcaças de tartarugas obtidas desses artigos foram 1054 no total em que 684 (64,91%) apresentavam plástico em seu trato gastrointestinal. Após a necropsia desses animais foram encontrados um total de 7465 itens antrópicos, apresentando uma média de 10,44 itens por animal.

No total, foram analisados 7.724 itens de detritos (Table 2) encontrados no trato gastrointestinal de tartarugas verdes (*Chelonia mydas*). A maioria dos detritos era composta por plásticos em folha, com 3.904(50,6%) itens, seguidos de fios/poliamida (1.657/ 21,5%) e plásticos rígidos (1.601/ 20,7%). Outros tipos de detritos incluíam itens diversos (391/ 5,1%), isopor (118/ 1,5%), canudos (20/ 0,3%), balões (18/ 0,2%), espuma (13/ 0,2%) e pellets (2/ 0,03%).

Table 2: Tipos dos detritos.

Autores	Carcças de <i>Chelonia Mydas</i>	Carcças com a presença de plástico	Total de itens antrópicos encontrados
Petry et al. (2021)	17	15 (88%)	653
Gomes et al. (2024), inside and outside the bay	66	46 (69.70%)	1683
Nunes, Broadhurst e Domit (2021)	497	460 (92.7%)	4654
Valente et al., (2022)	474	163 (34.3%)	475

Os detritos plásticos encontrados no trato gastrointestinal das tartarugas verdes (*Chelonia mydas*) apresentaram variadas colorações (Table 3). A maior parte dos itens era translúcida ou transparente, correspondendo a 2.108 itens (28,1% do total). O branco foi a segunda cor mais frequente, com 2.483 itens (33,1%), seguido por tons de marrom/âmbar, totalizando 704 itens (9,4%). O azul representa 577 itens (7,7%), enquanto o preto contabiliza 603 itens (8,0%). O verde correspondeu a 403 itens (5,4%), e o amarelo somou 306 itens (4,1%). Outras cores, como vermelho, rosa, roxo, laranja e cinza, apresentaram menores proporções, com 144 itens (1,9%), 47 itens (0,6%), 42 itens (0,6%), 60 itens (0,8%) e 27 itens (0,4%), respectivamente.

4. DISCUSSION

Gomes et al. (2024) em seu trabalho, realizou um levantamento das coloração dos resíduos ingeridos pelas tartarugas objetos de seu estudo (*Chelonia mydas*) e observou que a grande maioria dos objetos apresentavam coloração semelhantes a algas e alimentos naturais que fazem parte da dieta destes animais, que podem sugerir uma indução à ingestão destes resíduos.

Os resultados evidenciaram que a ingestão de detritos plásticos por *Chelonia mydas* pode estar relacionada a características como forma, cor e textura, que se assemelham ao alimento natural da espécie. No que se refere aos tipos de resíduos ingeridos, observou-se a predominância de plásticos do tipo sheet-like (filmes, sacolas e embalagens), registrados em maior quantidade tanto no ambiente externo quanto no interior da baía. Esse achado sugere que as tartarugas marinhas tendem a ingerir preferencialmente resíduos mais maleáveis, cuja aparência pode remeter às suas presas naturais. Essa interpretação é corroborada por Gomes et al. (2024), que, ao analisar a coloração dos resíduos ingeridos por *C. mydas*, verificaram que a maioria dos objetos apresentavam tonalidades semelhantes às algas e a outros componentes da dieta natural da espécie. Tal evidência indica que características visuais e táteis dos resíduos podem atuar como estímulos indutores da ingestão, reforçando a hipótese de que a coloração dos plásticos exerce influência significativa sobre o consumo, possivelmente em função do mimetismo visual com recursos alimentares naturais.

Sendo assim a elevada frequência de ingestão, associada à diversidade de itens registrados, evidencia a gravidade da poluição plástica sobre essa espécie marinha ameaçada de extinção, uma vez que a ingestão destes materiais causam comprometimento à saúde desses animais.

5. CONCLUSIONS

Os resultados desta revisão evidenciam que *Chelonia mydas* apresenta alta vulnerabilidade à poluição por plásticos ao longo do litoral brasileiro, devido à sua ampla distribuição geográfica e comportamento migratório, que a expõem a diferentes ambientes costeiros. Plásticos do tipo sheet-like e fios de poliamida foram os itens mais frequentemente ingeridos, provavelmente pela semelhança com presas naturais, o que favorece a ingestão acidental. Tal exposição pode gerar sérios impactos fisiológicos, incluindo obstruções gastrointestinais, perfurações e comprometimento da condição corporal, elevando os riscos à sobrevivência da espécie. Dessa forma, *C. mydas* se consolida como um bioindicador da qualidade ambiental marinha, reforçando a necessidade de implementação de políticas públicas, medidas de mitigação e programas educativos destinados à redução da entrada de resíduos plásticos nos ecossistemas costeiros. Tais estratégias são essenciais para a conservação das tartarugas marinhas e para a manutenção da integridade dos ecossistemas marinhos, contribuindo para a sustentabilidade dos oceanos frente à crescente poluição plástica.

Acknowledgments: In this section, you can acknowledge any support given which is not covered by the author contribution or funding sections. This may include administrative and technical support, or donations in kind (e.g., materials used for experiments).

Conflicts of Interest: Declare conflicts of interest or state “The authors declare no conflicts of interest.” Authors must identify and declare any personal circumstances or interest that may be perceived as inappropriately influencing the representation or interpretation of reported research results. Any role of the funders in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results must be declared in this section. If there is no role, please state “The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results”.

REFERENCES

1. GOMES, Beatriz Guimarães et al. Assessment of the ingestion of anthropogenic debris by green turtles along the south-central coast of Rio de Janeiro, Brazil. **Ocean and Coastal Research**, v. 72, p. e24042, 2024.
2. MARN, Nina et al. Quantifying impacts of plastic debris on marine wildlife identifies ecological breakpoints. *Ecology letters*, v. 23, n. 10, p. 1479–1487, 2020.
3. PETRY, Maria V. et al. Plastic ingestion by juvenile green turtles (*Chelonia mydas*) off the coast of Southern Brazil. *Marine pollution bulletin*, v. 167, n. 112337, p. 112337, 2021.
4. NUNES, Tawane Y.; BROADHURST, Matt K.; DOMIT, Camila. Selectivity of marine-debris ingestion by juvenile green turtles (*Chelonia mydas*) at a South American World Heritage Listed area. *Marine pollution bulletin*, v. 169, n. 112574, p. 112574, 2021.
5. SHORT, Fernanda S. et al. Antimicrobial-Resistant Bacteria from Free-Living Green Turtles (*Chelonia mydas*). *Antibiotics* (Basel, Switzerland), v. 12, n. 8, 2023.
6. ESPOSITO, Mauro *et al.* Levels of non-dioxin-like PCBs (NDL-PCBs) in liver of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) from the Tyrrhenian Sea (Southern Italy). *Chemosphere*, v. 308, n. Pt 2, p. 136393, 2022.
7. ARIENZO, Michele. Progress on the impact of persistent pollutants on marine turtles: A review. *Journal of marine science and engineering*, v. 11, n. 2, p. 266, 2023.
8. NASCIMENTO, Lorena Oliveira do et al. Solid waste ingestion by marine megafauna on Southeast Brazilian coast. *Marine pollution bulletin*, v. 190, n. 114821, p. 114821, 2023.
9. VALENTE, F. S. et al. **Análise dos resíduos antrópicos na dieta de *Chelonia mydas* (Linnaeus, 1758) no litoral centro-norte de Santa Catarina.** *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v. 26, n. 1, p. 14–29, 2022.
10. MARQUES, Robert Danylo Pereira *et al.* Compactação gastrointestinal em uma tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) juvenil por ingestão de resíduos sólidos: relato de caso. *Medicina Veterinária (UFRPE)*, v. 18, n. 3, p. 188–194, 2024.
11. GODOY *et al.* Rehabilitación de un ejemplar de Tortuga verde del Pacífico (*Chelonia mydas*) por ingesta de plástico y posterior trauma en vida silvestre. *Ciencia veterinaria*, v. 25, n. 2, p. 199–203, 2023.