

Microplásticos em Ecossistemas Aquáticos: busca de anterioridade e prospecção de tecnologias de degradação

Microplastics in Aquatic Ecosystems: prior art search and technology prospecting for degradation

Silvia Beatriz Beger Uchôa¹, Leandro Ramos Damasio¹, Lelan Queiroz Siqueira¹,
Marlivan Leite², Tadeu Barbosa de Oliveira¹

¹Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil

²Prefeitura Municipal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil

Resumo

Os microplásticos (MPs) são partículas de polímeros orgânicos sintéticos com tamanho inferior a 5 mm e são encontrados em oceanos e grandes lagos, rios e lagoas. O objetivo deste trabalho foi identificar tecnologias utilizadas para a degradação de microplásticos em ambientes aquáticos. As pesquisas foram realizadas nas bases de artigos Web of Science e Scopus e na plataforma de patentes Orbit. Os resultados revelaram aspectos relacionados a métodos e tecnologias para separação, detecção, degradação e mitigação de microplásticos no meio ambiente. As tecnologias de degradação foram divididas em dois mecanismos principais: “bióticos” e “abióticos”. Entre as técnicas bióticas, destacam-se o uso de enzimas, fungos e bactérias, enquanto as abordagens abióticas incluem fotocatalisadores, termodegradação, microrrobôs, entre outras. Pode-se concluir que há diversas tecnologias para degradar os MPs, mas também existe uma preocupação com a redução da emissão dessas partículas e a sua separação do ambiente aquático.

Palavras-chave: Microplásticos; Degradação; Poluição de Ambientes Aquáticos.

Áreas Tecnológicas: Ciências Ambientais. Sustentabilidade.

Abstract

Microplastics (MPs) are synthetic organic polymer particles smaller than 5 mm and found in oceans and large lakes, rivers and ponds. The objective of this study was to identify technologies used for the degradation of microplastics in aquatic environments. The research was carried out in the Web of Science and Scopus article databases and in the Orbit patent platform. The results revealed aspects related to methods and technologies for separation, detection, degradation and mitigation of microplastics in the environment. The degradation technologies were divided into two main mechanisms: “biotic” and “abiotic”. Biotic techniques include the use of enzymes, fungi and bacteria, while abiotic approaches include photocatalysts, thermodegradation, microrobots, among others. It can be concluded that there are several technologies for degrading MPs, but there is also concern about reducing the emission of these particles and separating them from the aquatic environment.

Keywords: Microplastics; Degradation; Aquatic Environmental Pollution.



1 Introdução

A poluição dos ambientes naturais, principalmente dos ecossistemas aquáticos, resultante das atividades humanas, tem se tornado um problema crescente devido à persistência e à toxicidade dos poluentes. Esses poluentes são despejados no ambiente, seja de forma intencional ou acidental, ameaçando os ecossistemas, a diversidade biológica e a saúde. Segundo Montagner *et al.* (2021), essa poluição é um problema de grande relevância ambiental e socioeconômica, resultante principalmente da má gestão dos resíduos sólidos.

De acordo com Urso e Pumera (2022), o uso crescente de materiais plásticos têm resultado na acumulação contínua de resíduos nos ambientes marinhos que se fragmentam em micro e nano plásticos. Essas partículas plásticas absorvem poluentes orgânicos tóxicos em sua superfície, apoiam o crescimento de biofilmes bacterianos que se propagam pela cadeia alimentar, representando sérios riscos para o ecossistema.

Segundo a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2023), os microplásticos (MPs) são partículas de polímeros orgânicos sintéticos com tamanho inferior a 5 mm que são encontrados em todo o oceano e nos grandes lagos, rios e lagoas, sendo pequenos o suficiente para serem ingeridos pela vida selvagem, o que amplia seus impactos negativos.

Conforme apontam Solanki, Sinha e Singh (2022), os MPs têm gerado preocupação devido à sua natureza não biodegradável. Eles podem ser ingeridos por organismos aquáticos, causando asfixia e emaranhamento e outros danos físicos. Além disso, sua persistência prolongada nos ecossistemas pode resultar em toxicidade que perdura por muito tempo, incluindo problemas de reprodução e de desnutrição nos seres vivos, afetando tanto a saúde dos animais quanto a dos seres humanos.

Um aspecto dessa questão é a poluição provocada por plásticos de tamanhos micrométricos e milimétricos. Como alerta a OECD (2022), em 2019, foram produzidas 465 milhões de toneladas de produtos plásticos, sendo lançados no ambiente 22 milhões de toneladas de plásticos, dos quais, 12% de microplásticos.

Alguns microplásticos, de acordo com National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2023), são fabricados para serem pequenos, pois têm uma finalidade específica (formação primária). Esses microplásticos primários incluem *pellets* de plástico, que são derretidos e utilizados para criar itens de plástico maiores, ou microesferas, presentes em produtos de higiene pessoal como: pasta de dente, sabonetes faciais e cosméticos. Os microplásticos secundários são originados de pedaços maiores de plástico, como garrafas de bebidas, sacolas e brinquedos. Segundo a citada organização, a

exposição ao sol, calor, vento e ondas pode tornar esses plásticos quebradiços, fazendo com que se fragmentem em pedaços cada vez menores que podem nunca desaparecer completamente (NOAA, 2023).

Os microplásticos também são gerados quando pedaços de plástico se quebram durante o uso (formação secundária). Um exemplo disso é quando as roupas, os móveis, as redes e as linhas de pesca produzem microfibras plásticas.

Pinheiro *et al.* (2023) destacam que, com relação aos estudos da poluição oriunda dos plásticos nos recifes de corais, em média, o material sintético constituiu 85% dos detritos antropogênicos nos diversos locais pesquisados variando de 50% a 100%, e a maioria dos itens (em torno de 73%) estava relacionada à pesca, como as linhas, os espinhéis, as redes fantasmas e as armadilhas descartadas.

A degradação de polímeros em ambientes aquáticos é um processo irreversível, ocorrendo de forma lenta e causando alterações na estrutura do material, decorrente da ação de condições ambientais, o que gera rachaduras, erosão superficial, abrasão e fragmentação em pequenas partículas, os chamados MPs. Considerando o aumento de resíduos plásticos nesses ambientes e o longo prazo para sua degradação natural, estudiosos citam a necessidade de pesquisas sobre os processos de separação e de degradação acelerada para reduzir a poluição provocada pelos plásticos e MPs (Geambulat; Dobre; Koncsag, 2022; Choong; Hadibarata; Tang, 2021).

O objetivo deste estudo foi realizar uma pesquisa prospectiva sobre a degradação de microplásticos, identificando as pesquisas mais relevantes, as patentes e as tendências tecnológicas que buscam mitigar esse tipo de poluição, especialmente no ambiente aquático.

2 Metodologia

A pesquisa foi realizada em âmbito internacional nas bases de dados da Web of Science e da Scopus para artigos, revisões de artigos e trabalhos equiparados e Orbit[®] para patentes. Ao final, buscou-se empresas que trabalham com reciclagem de detritos sólidos para identificar aquelas com uma ação que auxilia na retirada dos plásticos do solo, evitando o acúmulo e a consequente contaminação das zonas aquáticas, citando as mais aderentes à presente pesquisa.

Para o levantamento de publicações científicas, foram utilizadas as bases de dados Scopus e Web of Science (WoS). Os descritores utilizados foram: *microplastic**, *degrad**, *“microplastic* degrad*”* e *“marine OR water OR aquatic”* nos campos de pesquisa *“Article title, Abstract, keywords”* da base Scopus, e no campo *“Topic”* da WoS. A sintaxe final da Scopus foi: (TITLE-ABS-KEY (“microplastic* degrad*”)) AND TITLE-ABS-KEY (marine OR water OR

aquatic) e na WoS: TS=(“microplastic* degrad**”) AND TS=(marine OR water OR aquatic).

A pesquisa foi realizada entre os meses de maio a julho de 2024. Não foram empregados intervalos temporais. Os artigos da base WoS e da base Scopus foram exportados diretamente para a ferramenta Mendeley, seguindo estes critérios: os artigos da WoS foram exportados em formato .ris para o Mendeley, e os da Scopus foram exportados diretamente para o mesmo *software*, a fim de excluir as duplicatas. Além disso, foram gerados dados no modo RIS para serem interpretados pelo programa Vosviewer.

A prospecção tecnológica foi realizada na plataforma Orbit Intelligence – IP Intelligence. As buscas foram realizadas no campo “família de patentes”, utilizando-se os descritores: (((MICROPLASTIC+ AND DEGRADAT+) OR (MICROPLASTIC+ AND ECOMPOSIT+))/TI/AB/OBJ/ ADB/ICLM AND (MARINE OR AQUATIC OR WATER)/ TI/AB/OBJ/ADB/ICLM) utilizando a busca avançada.

Os dados coletados foram organizados em tabelas e gráficos, utilizando o programa Microsoft Excel e, após a depuração dos dados, retornou-se ao Orbit apenas com os documentos selecionados para elaboração de gráficos adicionais.

Os critérios de exclusão das patentes e dos artigos foram os documentos com tecnologias que não tratavam da degradação dos MPs em ambiente aquático, os que visavam a produção de polímeros biodegradáveis e os documentos que tratavam da degradação de plásticos em geral. Apesar de haver a ocorrência de documentos que tratam de remoção ou separação de MPs, esses foram considerados por se tratar de assunto relevante para a degradação dos MPs.

Os artigos selecionados foram avaliados com base em publicações na área de conhecimento, sobretudo os que se relacionam com a degradação de microplásticos em ambientes aquáticos, e as patentes foram quantificadas de

acordo com a tecnologia empregada para a degradação do composto sintético na forma de MP, citando ainda as relacionadas à separação/remoção e alguns casos interessantes para mitigar a produção desses MPs.

Foram pesquisadas páginas na internet de empresas que realizam a reciclagem de detritos sólidos, pois é uma ação que auxilia a retirada dos plásticos do solo, evitando a acumulação e a consequente contaminação das zonas aquáticas. As empresas, as parcerias e os programas voltados para a despoluição foram escolhidos após consulta ampla no buscador “Google” usando duas expressões: “reciclagem de microplásticos no Brasil” e, em seguida, “programas de reciclagem no Brasil”. Sendo assim, a escolha se deu de forma aleatória baseada em instituições que disponibilizassem em *site* na internet sua origem, história, países de atuação, produtos plásticos vendidos e os programas e parcerias por elas mantidos.

3 Resultados e Discussões

A Tabela 1 apresenta os resultados das buscas nas bases de dados Scopus e Web of Science. Essa busca resultou no total de 191 publicações, somando os dados das duas bases, levando em consideração os descritores “Microplastic* degrad**” mais os termos “Marine OR water OR aquatic” no campo *Article, Abstract, Keywords* da Scopus, e do *Topic*, da WoS.

Para análise dos dados, foram selecionados 122 estudos entre os 191, sendo que cinco deles foram excluídos por estarem duplicados e as demais 117 pesquisas foram selecionadas para análise, posto que estavam relacionadas à temática de degradação de microplásticos (MPs) no ambiente aquático. Entre as produções analisadas, foram identificados 111 artigos científicos e realizadas as revisões de artigos, cinco capítulos de livros e uma ata de conferência.

Tabela 1 – Resultados obtidos nas buscas por publicações nas bases Scopus e WoS

PALAVRAS-CHAVE	MICROPLASTIC	DEGRADATION	“MICROPLASTIC* DEGRAD**”	MARINE OR WATER OR AQUATIC	SCOPUS	WoS
Microplastic*	x				22.924	20.834
Degrad*	x	x			3.336	3.832
Marine OR water OR aquatic	x	x		x	2281	2670
"Microplastic* degrad**"			x		163	122
Marine OR water OR aquatic			x	x	108	83

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

A Figura 1 mostra o número de produções publicadas por ano, apresentando um grande crescimento nos últimos anos, especialmente em 2022 e 2023. O ano de 2024 mostra uma perspectiva tímida ao se considerar que a pesquisa utilizou dados até julho deste ano, ou seja, mais da metade do ano. Observa-se que pelo fato de MPs ser um termo recente de estudo, o crescimento foi acentuado nos anos de 2022 e 2023.

Verificou-se que 72 produções apresentaram o uso de uma determinada tecnologia para a degradação de microplásticos (MPs), 27 produções não demonstraram o uso de tecnologias para a degradação de microplásticos e 18 produções tratavam da degradação por vias naturais, ou seja, sem o uso de tecnologias. A partir dessa avaliação, realizou-se a divisão das 72 tecnologias em bióticas e não bióticas, sendo descritas brevemente a seguir.

Destaca-se que 25 artigos relataram o emprego de microrganismos como bactérias, fungos e algas, como tecnologia para a degradação de diferentes tipos de microplásticos. Esses microrganismos foram utilizados em combinação com métodos químicos, coagulação, sedimentação, eletrocoagulação, reações sol-gel, filtração, bactérias Gram-positivas e termofílicas, microbiota intestinal de insetos e intervenções biocatalíticas, incluindo consórcios microbianos.

Entre os artigos, 11 apresentaram resultados do uso de enzimas para a degradação físico-química de microplásticos. Das enzimas empregadas, destacam-se as enzimas extracelulares de bactérias, enzimas de fungos, a enzima PETase em levedura *Pichia*, a enzima DuraPETase, compostagem assistida por enzimas e a adição exógena de PET hidrolase termofílica à compostagem de alta temperatura, seja com uso de cepas ou de comunidades bacterianas.

Em artigo de revisão, Geambulat, Dobre e Koncsag (2022) citam que a degradação biótica de materiais poliméricos é realizada seletivamente, apenas por certos tipos de microrganismos e geralmente ocorre de forma bastante lenta. A ação de bactérias ou fungos se manifesta principalmente na superfície do polímero, aspecto confirmado pelas mudanças estruturais identificadas pela análise SEM. Outro aspecto citado foi que o processo de biodegradação começa com a formação de novos grupos funcionais como hidroxila, carboxila ou carbonila, que leva a uma série de reações subsequentes e que eventualmente causam a fragmentação da cadeia polimérica.

Em 17 artigos foi identificada a utilização da tecnologia abiótica de fotocatalisadores, sendo desenvolvida por meio de processos avançados de oxidação e degradação fotocatalítica, fazendo uso, inclusive, de semicondutores de óxidos metálicos nano/microestruturados, método de anodização, uso de N-TiO₂ – que é derivado do fluido extrapalial de mexilhões de água salgada. Houve, também, dentro desse contexto, a separação por materiais magnéticos, incluindo nanopartículas de ferro/ferrita.

Observou-se que sete documentos revelaram o uso do mecanismo abiótico de “luz ultravioleta simulada” para a degradação e três artigos apresentaram o mecanismo abiótico de termodegradação por meio dos processos HTL e HTP.

Outras tecnologias abióticas também foram verificadas, no entanto, com menor incidência de uso nas fontes analisadas, como: microrrobôs, osmose reversa, plasma não térmico, feixe de elétrons e pirólise, que, juntas, totalizaram nove ocorrências de uso.

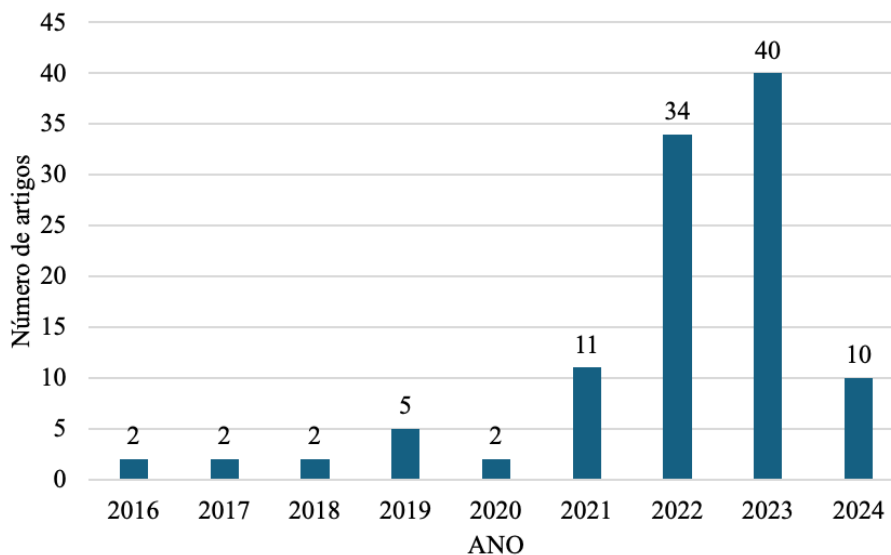
Com a finalidade de verificar a conexão entre os autores dos artigos, foi utilizado o programa VosViewer, sendo gerada a Figura 2 reunindo em *clusters* (bolhas) os principais autores que pesquisaram sobre a decomposição dos microplásticos no contexto mundial.

Os *clusters* dos autores indicam que há pesquisadores que estudam a degradação de MPs, muito embora haja pouco, ou praticamente nenhum, intercâmbio entre eles. Autores com apenas um artigo foram captados em 100 *clusters*, e o maior desses contém 27 autores, havendo conexão apenas entre dois deles, figurando no gráfico em cores vermelha e verde. Ao relacionar autores com pelo menos dois artigos, foram gerados 13 *clusters* de 31 autores.

Com relação à prospecção de tecnologias reveladas em documentos de patentes, após a exclusão dos documentos que não se enquadravam no espectro do estudo, foram identificados 81 documentos que tratam de tecnologias de degradação, separação e materiais inovadores para diminuir a produção de microplásticos.

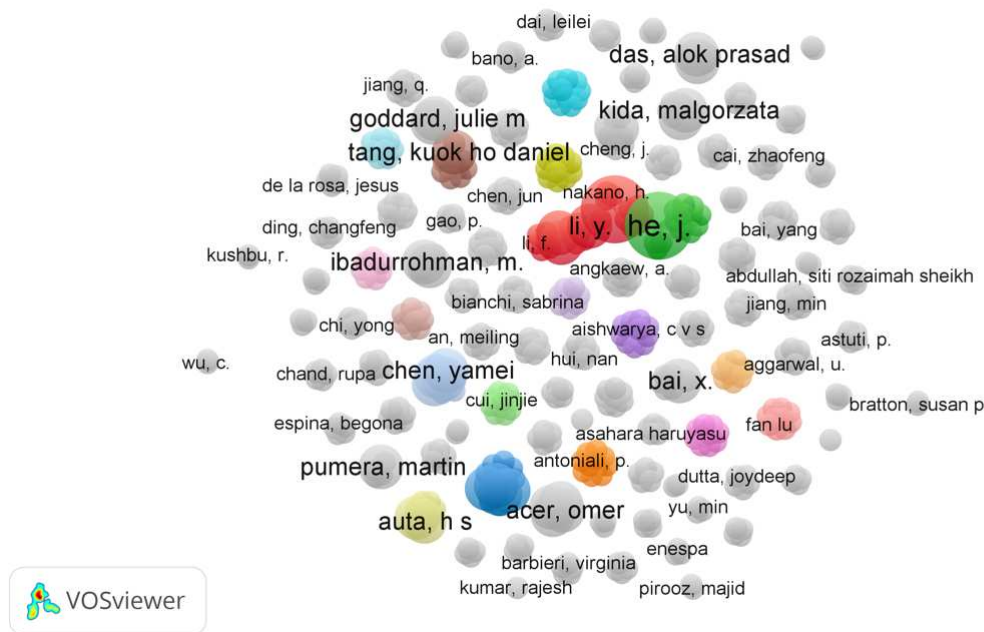
A evolução do número de depósitos de patentes referentes ao tema mostra um comportamento semelhante ao dos artigos, com o crescimento acentuado no ano de 2021, e devendo-se considerar que o ano de 2024 e o final de 2023 ainda apresentam documentos em sigilo dos 18 meses. A Figura 3 mostra a evolução com dados do primeiro depósito da família de patentes.

Figura 1 – Número de produções publicadas por ano nas bases WoS e Scopus



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

Figura 2 – Clusters de autores que pesquisaram sobre degradação de MPs, mostrando apenas dois clusters interligados



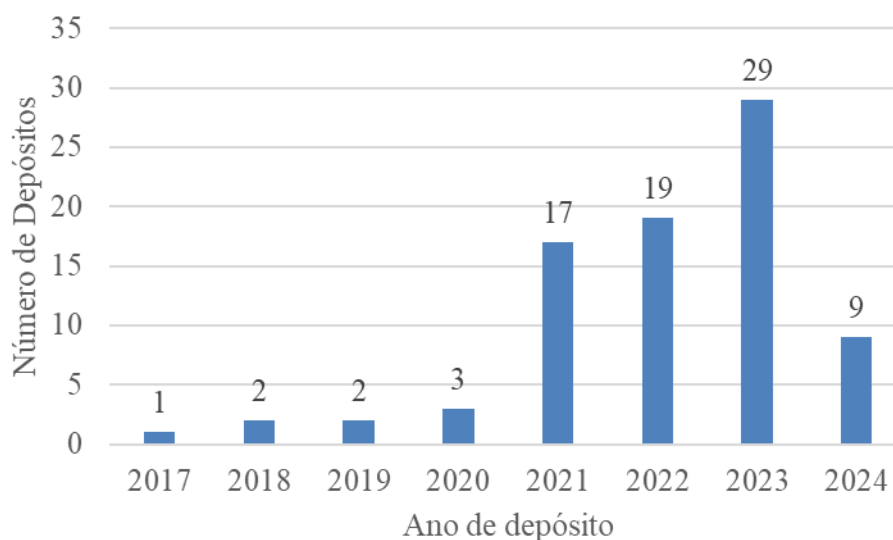
Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo com uso do VOSviewer (2024)

Como o tema MP é considerado recente, tanto para os artigos como para as patentes, observa-se o início dos depósitos em 2016 e 2017, respectivamente, e acentuando o crescimento após 2021.

Com relação ao estado das patentes depositadas, pode-se observar o seguinte: 30,78% (38) estão depositadas aguardando exame do pedido, 30,78% (38) dos pedidos foram concedidos 0,81% (1) foi cancelada e 0,81% (1) expirada e 2,43% (3) foram arquivadas por motivos diversos, como pode-se ver na Figura 4.

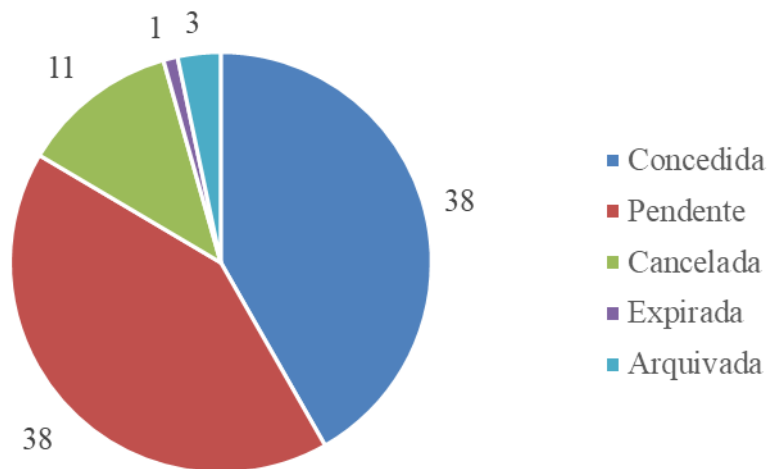
Observa-se que, apesar de ser um tema relativamente recente, há um número significativo de patentes concedidas, igualando ao número de depósitos ainda não analisados. Por se tratar de tecnologias ligadas à questão ambiental, pode-se inferir que há um grande interesse na análise dessas patentes, considerando que diversos países como Estados Unidos, Reino Unido, Austrália, Japão e China, além do Brasil, estabeleceram canais de exame de patentes acelerados para agilizar os processos de solicitação e exame, especialmente ligados ao tema de mudanças climáticas, o qual é frequentemente associado à questão da poluição das águas por MP.

Figura 3 – Número de documentos de patente depositados ao longo dos anos



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo, a partir do Orbit® (2024)

Figura 4 – Estado legal das patentes



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

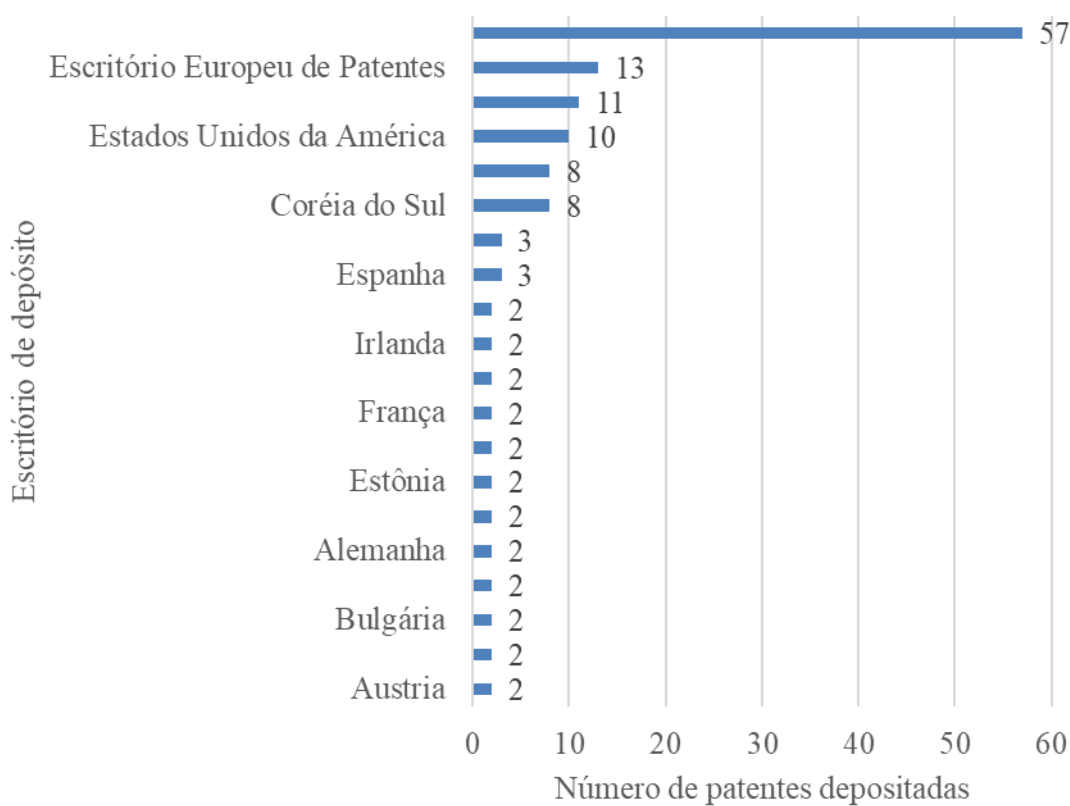
Em relação aos escritórios e países de proteção das famílias de patentes, há destaque para a China, seguida do escritório europeu, Japão e Estados Unidos, Figura 5. Há de se considerar que a costa da China foi apontada como um dos locais no qual se encontrou mais partículas de MP em 76 espécies de moluscos, bem como o Sistema Estuarino de Santos (Magno *et al.*, 2024). Ou seja, apesar de ser citado que a Índia é o maior poluidor do mundo em termos de resíduos plásticos, há relatos de grande número de resíduos de MPs na costa da China, até justificando a busca por tecnologias protegidas nesse país. A Figura 5 traz o quantitativo de famílias de patentes depositadas por escritório de depósito.

Entre os 30 maiores depositantes das patentes referentes ao tema, a titularidade está distribuída entre 13

universidades, oito institutos de pesquisa, três empresas do ramo comercial de bens de consumo, três empresas de energia (petróleo ou química), duas empresas de engenharia (ambiental ou química) e uma fundação de apoio à academia, mostrando a grande prevalência da academia na busca de soluções para mitigar o problema da poluição por MPs nos ambientes aquáticos.

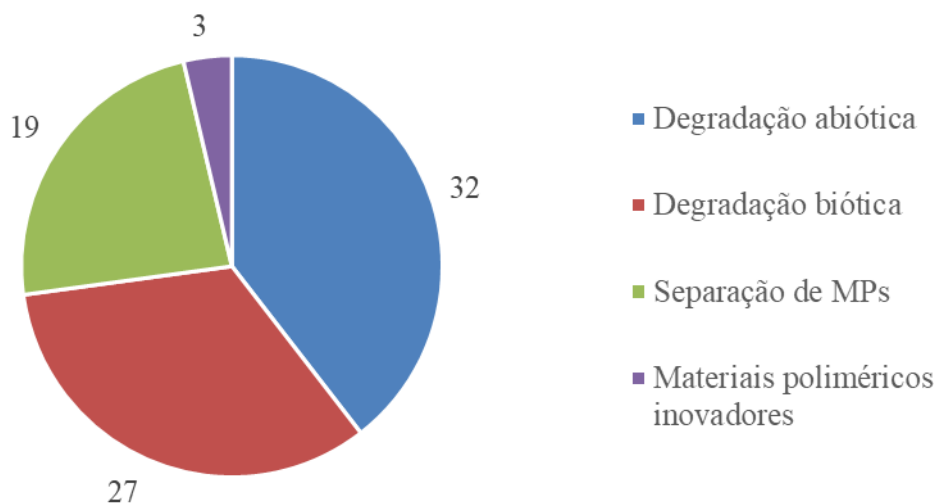
Da mesma forma como foi realizado com os artigos, dividiu-se as tecnologias protegidas em bióticas e abióticas. Entre as bióticas, há a utilização de microrganismos como algas, fungos e bactérias. A Figura 6 apresenta a distribuição das tecnologias descritas nas patentes em: degradação abiótica, degradação biótica, separação e materiais poliméricos inovadores.

Figura 5 – Número de famílias de patentes depositadas por países e escritórios de proteção



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo a partir do Orbit® (2024)

Figura 6 – Tecnologias de degradação, separação e materiais poliméricos inovadores reveladas em documentos de patentes



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

Observou-se que, dentro da busca por degradação, o tema da separação se encontra presente, pois os MPs apresentam dificuldade tanto em sua detecção como na separação, devido às suas pequenas dimensões. Os materiais poliméricos inovadores detectados nesta pesquisa se referem a materiais que emitem menor quantidade de MPs.

Pode-se observar que essas tecnologias podem ser separadas em diversos temas, como: a separação, envolvendo detecção, mecanismos bióticos; ou biodegradação, mecanismos abióticos, como adsorção e oxidação avançada, além da prevenção de geração de resíduos, para os quais são apresentados alguns exemplos a seguir.

Separação e detecção: o uso de proteínas e peptídeos de fusão inovadores para a separação e detecção de microplásticos em diversos ambientes é um tema recorrente, podendo ser citado o documento EP3810637, o qual descreve uma nova proteína de fusão e/ou peptídeo de fusão, de preferência para uso na separação e/ou detecção em um ambiente de um ou mais polímeros ou plásticos-alvo. A capacidade de identificar e de isolar microplásticos é crucial para análises e o desenvolvimento de soluções de remediação.

Mecanismos bióticos/biodegradação: a biodegradação, utilizando microrganismos e enzimas, surge como uma solução promissora para a degradação de microplásticos. Diversas patentes descrevem o uso de fungos, bactérias e enzimas específicas para a degradação de diferentes tipos de plástico, como poliuretano, poliestireno e PET, por exemplo, o documento CN114214204, cuja invenção se refere ao campo dos microrganismos ambientais, especificamente,

a invenção se refere a uma cepa de fungo *Cladosporium halotolans* capaz de degradar poliuretano.

Adsorção: a adsorção, utilizando materiais como biocarvão, aerogéis e compósitos, é outra estratégia importante para a remoção de microplásticos da água, exemplificando com o documento CN117902664, o qual traz uma invenção que pertence ao campo técnico de remoção de poluentes do corpo d'água e se refere particularmente a um método de remoção eficiente e degradação catalítica verde de microplásticos no corpo d'água. A capacidade de adsorver microplásticos permite a sua concentração e posterior remoção ou tratamento.

Oxidação avançada: processos de oxidação avançada, como fotocatalise, eletrocatalise e o uso de reagentes oxidantes, são explorados para degradar microplásticos em substâncias menos nocivas. Cita-se o documento CN117985900, o qual divulga um dispositivo e um método para degradar microplásticos na água com base em um eletrodo tridimensional de pré-oxidação. A oxidação avançada oferece uma alternativa para a quebra de ligações químicas em microplásticos, facilitando a sua decomposição.

Prevenção: a prevenção da formação de microplásticos, por meio do desenvolvimento de fibras e materiais menos propensos à fragmentação, é abordada em algumas patentes. Essa prevenção pode ser usada para redução dos microplásticos e microfibras produzidos pelo processo de lavagem de roupas, como os documentos WO 2023099807 e a WO2023000892, nas quais se utiliza um reator para capturar e calcinar os MPs e mesmo com a produção de fibras que não gerem desprendimento de microplásticos como as patentes CN115852519 e CN116103781.

As principais fontes de resíduos plásticos sintéticos no ambiente marinho são resíduos do turismo costeiro, pesca, indústrias marítimas e fabricação de produtos plásticos que têm impacto direto nos mares e oceanos (Cole *et al.*, 2011; Veiga *et al.*, 2016). A prevenção da formação de microplásticos na fonte é essencial para a mitigação do problema a longo prazo.

Melhores resultados podem ser alcançados combinando vários métodos para degradar espécies mistas de plásticos, que podem ser pré-tratados com luz e calor para quebrar algumas ligações químicas em plásticos que são difíceis de serem atacados biologicamente para formar polímeros de baixo peso molecular e, em seguida, usar o processo de biodegradação para a degradação final desses produtos (Liu *et al.*, 2022), por exemplo, a adsorção seguida de biodegradação ou oxidação avançada.

As supracitadas pesquisas refletem que as tecnologias de biodegradação ainda estão em desenvolvimento, o que leva a entender que existem oportunidades para descoberta de novas formas de decomposição de microplásticos e na viabilidade de patenteamento delas.

Fazendo-se uma relação com os artigos e com as revisões de artigos prospectadas neste estudo, observa-se que as tecnologias provenientes das patentes têm relação direta com os estudos advindos das produções científicas. Por exemplo, há tecnologia que se refere a uma composição de limpeza que degrada microplásticos compreendendo MHETase, que tem relação com os microplásticos provenientes das lavagens de roupas em máquinas de lavar, a qual decompõe os tecidos em pequenas fibras que são despejadas sem tratamentos nas redes pluviais. Na intenção de destacar a convergência com os estudos prospectados, na descrição do documento de patente WO 2024/094679, afirma-se que:

[...] aproximadamente 64% das roupas contêm plástico, portanto, boa parte dessas microfibras, por conterem plástico, são por sua vez microplásticos que se acumulam nos oceanos. O problema chegou a um ponto em que se estima que 35% de todos os microplásticos primários nos oceanos provêm da lavagem de roupa (Microo Terraforming, 2024).

De acordo com a patente WO 2024/094679, a tecnologia de degradação coaduna-se com o que foi pesquisado nos artigos, pois a inovação vem para mitigar os efeitos que os microplásticos constituem para a saúde da vida marinha e para os seres humanos.

Na descrição da patente, o inventor deixa evidente que as partículas de MPs se acumulam em corpos d'água, organismos e até se dispersam pelo ar, e, em muitos casos, são tão pequenas que podem atravessar membranas e interferir nos processos metabólicos

celulares dos organismos, e que, não obstante os efeitos dessas partículas para os seres humanos ainda não tenham sido completamente estudados, pesquisas em animais marinhos apontam que elas reduzem a fertilidade, a taxa de eclosão dos ovos e a vitalidade, causando deformações no desenvolvimento corporal.

A invenção que resolve esse problema específico concretizada por essa patente é uma composição de lavagem, ou de limpeza, que contém pelo menos uma enzima capaz de decompor microplásticos. Essa composição mantém os tecidos intactos em escala macroscópica, enquanto decompõe o plástico das microfibras liberadas durante a lavagem. As moléculas resultantes das reações químicas são biodegradáveis e inofensivas para a vida marinha. Sendo assim, trata-se de uma solução que não afeta a qualidade dos produtos existentes, nem dos tecidos, nem o nível de limpeza, e é de fácil implementação, além de implicar custos muito baixos para o consumidor final.

Outro documento de patente WO 2024/095290 relacionada à degradação do MP é a que utiliza a biodegradação de polietileno utilizando fitoconstituintes e uma composição para degradação de microplásticos, e que guarda relação com os estudos provenientes dos artigos (Xavier, 2024).

A partir desta prospecção, observa-se que já há algumas tecnologias que foram desenvolvidas para degradar os MPs. Essas tecnologias emergentes para a degradação de microplásticos refletem uma abordagem diversificada, englobando soluções enzimáticas, químicas, biológicas e físicas.

Abordagens baseadas em Inteligência Artificial também são exploradas para otimizar a ação de enzimas microbianas na degradação de plásticos. Nesse ínterim, a China lidera com sete patentes, incluindo agentes de degradação metálicos, fotocatalisadores, microalgas, e bactérias especializadas. Essas tecnologias variam desde composições químicas até a utilização de organismos vivos, proporcionando soluções eficientes para a degradação de microplásticos em corpos d'água.

Nos Estados Unidos, plásticos bioativos com degradação programável representam um avanço significativo na engenharia de materiais, permitindo a eliminação controlada de microplásticos. Além disso, a Coreia do Sul contribui com inovações por meios físicos de filtragem, como uso de filtros especializados e descartáveis, enquanto o México e outros países exploram fotocatalise e métodos biológicos para abordar esse óbice ambiental. Essas patentes refletem uma recente tendência de inovação tecnológica voltada para a preservação ambiental e a saúde dos ecossistemas aquáticos, destacando a urgência e a diversidade de abordagens necessárias para enfrentar a poluição por microplásticos.

Em resumo, a pesquisa revela um panorama dinâmico e internacional de desenvolvimento tecnológico, com algumas nações contribuindo para o avanço das tecnologias de degradação de microplásticos.

Observou-se, analisando os artigos, que a ação humana é determinante para a contaminação do meio ambiente pelos microplásticos, devido ao descarte irregular e desordenado de materiais que poderiam ser reciclados ou reaproveitados. O lixo comum de residências e empresas, assim como o lixo contaminado de clínicas, laboratórios e hospitais geralmente são direcionados aos aterros (solo), e, assim, podem ser facilmente carregados para o ambiente aquático poluindo esse ecossistema.

Em pesquisa em páginas eletrônicas de empresas que trabalham com a reciclagem de detritos sólidos, buscou-se identificar aquelas com uma ação que auxilia na retirada dos plásticos do solo, evitando o acúmulo e a consequente contaminação das zonas aquáticas, considerando que essas empresas são atores importantes no tratamento dos resíduos plásticos, evitando que estes permaneçam no meio ambiente. Sendo assim, conforme mencionado, de maneira exemplificativa, são listadas três empresas/instituições que apresentam em suas páginas eletrônicas a preocupação com a reciclagem.

3.1 Alpla

É uma empresa familiar fundada na Áustria e que atua na produção de garrafas PET, tampas, peças de moldagem e demais embalagens específicas. Em 2013, a Alpla aderiu à iniciativa Zero Pellet Loss (ZPL). *Pellets* são pequenas esferas de polímeros que, devido ao seu tamanho, tendem a se perder em fendas ou atrás de máquinas, ou ficam presas nas solas dos sapatos dos colaboradores. O que significa que eles acabam indo para o meio ambiente ou para as massas de água. Para evitar isso, foram desenvolvidos aspiradores especiais, sistemas de coleta para silos ou filtros de águas residuais feitos sob medida. Além disso, verificou-se que Alpla colabora financeiramente com organizações sem fins lucrativos na luta contra a poluição dos oceanos, como: A The Great Bubble Barrier (Grande Barreira de Bolhas) que tem como objetivo libertar rios e canais de resíduos plásticos com a ajuda de uma barreira feita de bolhas de ar; com o “O Plastic Collective”, que, por sua vez, oferece o treinamento e os equipamentos necessários em regiões remotas, ou desfavorecidas, para garantir que a reciclagem seja reconhecida como um modelo de negócios e se torne viável; e com a “Waste Free Oceans”, que coleta lixo plástico em mares e costas e os recicla para “Ocean Plastic”.

3.2 TerraCycle

Na TerraCycle a missão é: “Eliminar a Ideia de Lixo®”. Por meio da colaboração e da inovação, a TerraCycle

desenvolve soluções em reciclagem e reuso. Sendo assim, os resíduos plásticos são reduzidos em tamanho – tornam-se menores ao serem triturados ou moídos – e, em seguida, derretidos e transformados em *pellets*, flocos ou pó. Seus cientistas e especialistas internos trabalham em colaboração com universidades que analisam os tipos de resíduos para determinar a maneira correta de processar e transformá-los em novos produtos. Esse processo inclui etapas como fragmentar os resíduos, separá-los em diferentes categorias e, em seguida, reciclá-los para serem reintroduzidos na cadeia produtiva. Além disso, a empresa tem como parceiros e programas: o “Programa de Reciclagem de Instrumentos de Escrita Faber-Castell®”, que recicla seus instrumentos de escrita; o “Programa de Reciclagem de Esponjas Scotch-Brite®”, que recicla suas esponjas usadas e embalagens; o “Programa de Reciclagem de Cápsulas de Café illy”, que recicla suas cápsulas usadas illy Iperespresso*; o “Programa de Reciclagem de Cápsulas de Café Melitta®”, que recicla suas cápsulas de café usadas; o “Programa de Reciclagem Weleda”, que oferece aos consumidores a oportunidade de dar o destino ambientalmente correto às embalagens vazias ou em desuso de medicamentos antroposóficis, manipulados e cosméticos.

3.3 Braskem

A Braskem é uma empresa global líder na produção de resinas termoplásticas (PE+PP+PVC), a qual utiliza soluções de reciclagem mecânica e química. Essa instituição trabalha no aprimoramento de tecnologias e de soluções para a reciclagem química, ou seja, a transformação dos resíduos plásticos em insumos químicos, combustíveis ou matéria-prima para a fabricação de novos produtos plásticos. No processo de reciclagem mecânica, o plástico pós-consumo é triturado em pedaços menores, passa por um processo chamado extrusão e se transforma em pequenos grânulos, os sobreditos *pellets*. Em parceria com a “Alcamare”, maior recicladora da região, a Braskem busca aumentar a reciclagem de PE e PP. Percebeu-se que a Braskem também fez parcerias com a Wise Plásticos S.A, pois assinou um contrato com essa empresa, ampliando a capacidade de reciclagem de resíduos plásticos para transformação em resinas recicladas pós-consumo. A Braskem também firmou parceria com a “Ilha de economia circular”, que tem como objetivo acelerar o desenvolvimento e a aplicabilidade das resinas recicladas pós-consumo, trazendo ganhos de qualidade, variedade e eficiência para atender às mais altas exigências do mercado de plástico e do setor de embalagens.

Apesar de haver algumas iniciativas por parte das empresas citadas, pode-se afirmar que são iniciativas ainda incipientes diante do panorama de poluição causada pelos resíduos plásticos, os quais podem gerar MPs.

4 Considerações Finais

A poluição por microplásticos é um problema ambiental significativo que afeta diretamente os ecossistemas aquáticos e, por extensão, a saúde humana. A análise das patentes e das pesquisas, destacadas neste estudo, revela um esforço inicial em encontrar soluções tecnológicas para a degradação de microplásticos. A diversidade de abordagens, desde o uso de enzimas e compostos naturais, até a aplicação de inteligência artificial e técnicas físicas e químicas avançadas, mostra que a comunidade científica e os inventores estão explorando caminhos para abrandar esse problema.

A predominância de patentes originárias da China, seguida por contribuições da Europa, Japão e Estados Unidos, indica que essas nações estão na dianteira do desenvolvimento de tecnologias para a degradação de microplásticos. A concentração de patentes registradas nos últimos anos, especialmente a partir de 2021, reflete uma crescente conscientização e urgência em abordar a poluição por microplásticos de maneira eficaz e sustentável, e isso dependerá de vários fatores, como o desenvolvimento continuado de tecnologias já existentes e no desenvolvimento de novas formas de filtragem ou de degradação de microplásticos, focando, inclusive, em métodos biológicos, como o uso de enzimas, microrganismos, bactérias e fungos capazes de efetivar a decomposição dos variados compostos sintéticos, além de investir em abordagens químicas avançadas.

Uma maior colaboração internacional, e entre os pesquisadores, se faz necessária, pois a poluição por microplásticos é um problema global que exige uma resposta coordenada, evidenciada pela pouca interação, inclusive nos artigos. Essa colaboração pode acelerar o desenvolvimento de soluções eficazes, justamente pelo compartilhamento de tecnologias associadas. Junto a isso, políticas públicas e regulamentação para o descarte desse material devem ser implementadas, mas, para isso acontecer, os governos e as organizações internacionais deveriam implementar políticas que incentivem a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de degradação de microplásticos.

A educação e a conscientização sobre os impactos dos microplásticos e as práticas de consumo sustentável somam-se a várias outras ações de tecnologias vistas, já que esse problema é também um dilema social. Deve-se reduzir a demanda por plásticos e promover o uso de alternativas biodegradáveis. Para tanto, se fazem necessários, primordialmente, investimentos em pesquisa e inovação por parte das empresas que produzem plásticos e microplásticos, já que é um caso não só de poluição do meio ambiente, como também de saúde pública. Assim, o financiamento para pesquisas sobre degradação de microplásticos é

essencial. Universidades, instituições de pesquisa, empresas e governo devem ser sinérgicos no combate a esse tipo de contaminação.

Embora o estudo atual revele progressos na pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias de degradação de microplásticos, ainda há muito a ser feito. As soluções eficazes exigem uma abordagem multidisciplinar e colaborativa, integrando avanços tecnológicos com políticas para mitigar de maneira sustentável a poluição por microplásticos nos ecossistemas aquáticos.

5 Perspectivas Futuras

Para o futuro, é importante continuar investindo em estratégias e em tecnologia de degradação de microplásticos nos ecossistemas aquáticos, terrestres e no ar, pois estes, de certa forma, estão interligados. O presente trabalho, dentro de suas limitações, contribuiu para reiterar a necessidade de desenvolver novas tecnologias de degradação de microplásticos, além da integração das técnicas de detecção e separação com as técnicas de degradação propriamente ditas. A prospecção deixou explícito que ainda há poucos artigos que interagem com esse tipo de demanda, além de pouco interesse em aspectos de reciclagem, muito voltados para a degradação. Por conseguinte, ficou evidente que há poucas inovações que mitiguem esse tipo de problema, sendo necessário o uso de tecnologias que diminuam a liberação dos MPs. Além disso, há que se considerar que os MPs são oriundos de diferentes polímeros, apresentando comportamentos distintos, tanto para separação como para a sua degradação. As tecnologias preditas começaram a ser protegidas a partir de 2017, com crescimento acentuado nesta última década, o que mostra que estão em ascensão, mas, mesmo assim, ainda são incipientes. Sugere-se uma interligação dos estudos já feitos com as empresas que produzem resíduos sintéticos examinando, dessa vez, a efetividade das políticas adotadas por essas entidades.

Referências

- ALPLA. **Microplástico**. [2024]. Disponível em: <https://www.alpla.com/pt/micropl%C3%A1stico>. Acesso em: 1º jul. 2024.
- BRASKEM. **Eliminação de resíduos plásticos**. [2024]. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/eliminacaoderesiduosplasticos>. Acesso em: 1º jul. 2024.
- CHOONG, W. S.; HADIBARATA, T.; TANG, D. K. H. Abundance and distribution of microplastics in the water and riverbank sediment in Malaysia – A review. **Biointerface Res. Appl. Chem.**, 2021.

COLE, M. *et al.* Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. **Mar Pollut Bull**, v. 62, n. 12, p. 2588-2597, 2011. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.

GEAMBULAT, Aila Elmazm; DOBRE, Tănase; KONCSAG, Claudia Irina. Experimental investigations on polyethylene and polyethylene terephthalate microplastics' degradation. A review. **Sciendo. Ovidius University Annals of Chemistry**, v. 33, n. 2, p. 156-165, 2022. Disponível em: <https://sciendo.com/article/10.2478/auoc-2022-0023>. Acesso em: 30 jun. 2024.

LIU, L. *et al.* On the degradation of (micro)plastics: Degradation methods, influencing factors, environmental impacts. **Science of The Total Environment**, v. 806, part 3, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721063907>. Acesso em: 2 dez. 2024.

MAGNO, I. *et al.* (org.). **Fragmentos da destruição: impactos do plástico na biodiversidade marinha brasileira**. 1. ed. Brasília, DF: Oceana. 2024. 41p. Disponível em: https://brasil.oceana.org/wp-content/uploads/sites/23/2024/10/Fragmentos-da-Destruicao_FINAL-FINAL-FINAL_compressed.pdf. Acesso em: 2 dez. 2024.

MICROO TERRAFORMING, S. L. Composição de limpeza degradante de microplásticos contendo MHEtase. Inventores: Vidarte Gordillo, Miguel; Vidarte Gordillo, Pablo Manuel. Titular: Microo Terraforming, S. L. World Intellectual Property Organization (WIPO). **Pedido internacional PCT/EP2023/080330**, publicado como WO 2024/094679, em 10 maio 2024. Disponível em: https://patentscope.wipo.int/search/pt/detail.jsf?docId=ES420572040&_fid=WO2024094679. Acesso em: 8 dez. 2024.

MONTAGNER, C. C. *et al.* Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos. **Quim. Nova**, Campinas, SP, v. 44, n. 10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170791>.

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Marine Debris Program. **Microplastics: What are Microplastics?** Em 2 de julho de 2023. Disponível em: <https://marinedebris.noaa.gov/what-marine-debris/microplastics>. Acesso em: 3 jun. 2024.

OCDE – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Global Plastics Outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options**. Paris: OECD Publishing, 2022. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/2022/02/global-plastics-outlook_a653d1c9.html. Acesso em: 15 ago. 2024.

PINHEIRO, H. T. *et al.* Plastic pollution on the world's coral reefs. **Nature**, v. 619, p. 311-316, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>. Acesso em: 8 jun. 2024.

SOLANKI, S.; SINHA, S.; SINGH, R. Myco-degradation of microplastics: an account of identified pathways and analytical methods for their determination. **Biodegradation**, v. 33, p. 529-556, outubro de 2022.

STEENSMA, H. K. Acquiring technological competencies through inter-organizational collaboration: An organizational learning perspective. **Journal of Engineering and Technology Management**, v. 12, n. 1, January, 1996. Disponível em: <https://pdf.sciencedirectassets.com/271651/1-s2.0-S0923474800X0001X/1-s2.0-0923474895000135/main.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2024.

TERRACYCLE. **Eliminando a ideia de lixo**. [2024]. Disponível em: <https://www.terracecycle.com/pt-BR/about-terracecycle/>. Acesso em: 1º jul. 2024.

URBANEK, A. K.; RYMOWICZ, W.; MIROŃCZUK, A. M. Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. **Appl Microbiol Biotechnol**, v. 102, n. 18, p. 7669-7678, Sep. 2018. DOI: 10.1007/s00253-018-9195-y. Epub 2018 Jul 11. PMID: 29992436; PMCID: PMC6132502.

URSO, M.; PUMERA, M. **Nano/Microplastics Capture and Degradation by Autonomous Nano/Microrobots: A Perspective**. [2022]. Disponível em: <https://www-webofscience-com.ez9.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/summary/83c77f10-e346-460e-a2e7-ea9aaa520e09-f1f1aa47/relevance/1>. Acesso em: 4 jun. 2024.

VEIGA, J. M. *et al.* **Identifying Sources of Marine Litter**. MSFD GES TG Marine Litter Thematic Report; JRC Technical Report; EUR 28309, 2016. DOI:10.2788/018068.

XAVIER, Elsy. Composição de degradação microplástica. Inventora: Xavier, Elsy. Titular: Xavier, Elsy. World Intellectual Property Organization (WIPO). **Pedido internacional PCT/IN2023/051009**, publicado como WO 2024/095290, em 10 maio 2024. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/pt/detail.jsf?docId=WO2024095290>. Acesso em: 2 dez. 2024.

Sobre os Autores

Silvia Beatriz Beger Uchôa

E-mail: sbuchoa@ctec.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2317-5554>

Doutora em Química e Biotecnologia pela UFAL em 2007. Endereço profissional: Câmpus A. C. Simões, Prédio da Reitoria, Coordenadoria de Inovação e Empreendedorismo, Avenida Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.

Leandro Ramos Damasio

E-mail: leandro.damasio@dcf.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4502-7354>

Especialista em Auditoria e Controladoria pela Faculdade Figueiredo Costa em 2011.

Endereço profissional: Câmpus A. C. Simões, Prédio da Reitoria, Departamento de Contabilidade e Finanças, Avenida Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.

Lelan Queiroz Siqueira

E-mail: lelan.siqueira@ics.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9139-8680>

Especialista em Direito Administrativo pela Faculdade Internacional Signorelli em 2013.

Endereço profissional: Câmpus A. C. Simões, Instituto de Ciências Sociais, Avenida Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.

Marlivan Leite

E-mail: marlivan.leite@iqb.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3605-9225>

Especialista em Direito Previdenciário pela CESMAC em 2018.

Endereço profissional: Rua Barão de Jaraguá, n. 195, Jaraguá, Maceió, AL. CEP: 57025-903.

Tadeu Barbosa de Oliveira

E-mail: tadeu.oliveira@dcf.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9264-0524>

Especialista em Gestão Financeira, Controladoria e Auditoria pelo Centro Universitário CESMAC em 2011.

Endereço profissional: Câmpus A. C. Simões, Prédio da Reitoria, Departamento de Contabilidade e Finanças, Avenida Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.