

---

## Novas abordagens para degradação de microplásticos com ênfase nos processos biológicos

Luís Felipe Oliva dos Santos, Thaís Marques Uber, Vinícius Mateus Salvatori Cheute, José Rivaldo dos Santos Filho, Rúbia Carvalho Gomes Corrêa, Cristina Giatti Marques de Souza, Rafael Castoldi, Adelar Bracht, Rosane Marina Peralta

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-21-3.c4>

### Resumo

Plásticos são essenciais para a sociedade moderna, com aplicações em diferentes áreas incluindo embalagens de alimentos, aparelhos médicos, eletrônicos, produtos de consumo etc. Embora os benefícios dos plásticos sejam inquestionáveis, a má gestão e o descarte inadequado de resíduos plásticos estão aumentando a poluição por plásticos em todo o mundo. O acúmulo de resíduos plásticos em ambientes naturais está ameaçando tanto a saúde animal (por exemplo, por ingestão, sufocamento e emaranhamento) quanto a humana (por exemplo, limitando os meios de subsistência, afetando a segurança e a qualidade dos alimentos, fornecendo habitats adequados para doenças zoonóticas), ao mesmo tempo em que impõe uma pressão econômica crescente para superar perdas no turismo, pesca e habitats. O problema torna-se maior porque os resíduos plásticos são de difícil degradação em ambientes abertos devido à sua composição polimérica resiliente. Em vez disso, eles sofrem deterioração e fragmentação em microplásticos e nanoplásticos por processos físico-químicos. Esses pequenos detritos plásticos não conhecem fronteiras e podem ser facilmente transportados e até mesmo carregar uma série de produtos químicos perigosos e patógenos para ambientes variados, afetando potencialmente a biota em diferentes sistemas biológicos e, conseqüentemente, ameaçando os ecossistemas. Esta revisão pretende fornecer uma visão geral ampla sobre os últimos avanços tecnológicos e biotecnológicos que podem abrir caminho para uma remediação ambiental eficaz e eficiente de microplásticos, e abordar criticamente os principais desafios e potenciais soluções para superá-los.

**Palavras-chave:** Biodegradação; Processos biológicos; Processos enzimáticos; Remediação, Resíduos plásticos

## 1. INTRODUÇÃO

A produção global de plásticos ultrapassa 300 milhões de toneladas por ano e a contaminação ambiental causada por eles é um dos principais problemas que afetam a sociedade (GESAMP, 2015; EFSA, 2016; KOELMANS et al., 2017; LUSHER et al., 2017; EKANAYAKA et al., 2022). O problema ambiental causado pelos plásticos torna-se um problema de saúde pública graças à fragmentação dos plásticos descartados inadequadamente graças à qual são gerados resíduos mínimos desses materiais (microplásticos-MPs, mesoplásticos-MePs e pellets plásticos), além da liberação intencional em produtos como esfoliantes faciais e produtos de higiene pessoal. Essas partículas são tão pequenas que podem ser encontradas em praticamente todos os ambientes, desde oceanos a ambientes terrestres, sendo incorporadas aos animais marinhos e terrestres (KARAMI et al., 2018; SAPEA, 2019; ZHANG et al., 2018; DE-LA-TORRE et al., 2023).

Os MPs, MePs e pellets plásticos podem interagir com poluentes orgânicos persistentes, absorvendo uma ampla quantidade de compostos bioacumulativos e tóxicos, acarretando influências complexas e prejudiciais aos organismos. Além da própria toxicidade biológica, pode ocorrer deposição dos MPs nas vias aéreas e outros tecidos humanos e animais, o que pode levá-los a desempenhar papel de vetores de poluentes com capacidade significativamente aprimorada com o passar do tempo (KARAMI et al., 2016; QIN et al. 2021; LAN et al. 2021; ISLAM et al., 2023). É de suma importância desenvolver estratégias eficazes para a minimização dos riscos associados à presença desses micropoluentes no meio ambiente, protegendo, assim, a saúde dos ecossistemas e dos seres vivos. (WANG et al., 2022; LIU et al., 2019).

Técnicas de biotratamento para a remoção de MPs, MePs e pellets plásticos vêm sendo desenvolvidas, como abordagens empregando fitorremediação, microrremediação, organismos filtradores e bactérias (MILOLOŽA et al., 2022). Os fungos são conhecidos por sua habilidade em produzir e secretar enzimas (enzimas hidrolíticas tais como lipases e esterases e enzimas oxidativas tais como as peroxidases e oxidases), capazes de degradar uma variedade de poluentes complexos. Eles podem atuar sobre os polímeros dos plásticos, degradando-os em fragmentos menores que podem ser mais facilmente assimilados e mineralizados. Essa é uma estratégia considerada

promissora para remoção e tratamento dos plásticos (MILOLOŽA et al., 2022; KASMURI et al., 2022). Processos de oxidação avançada também são amplamente aplicados, como a oxidação de Fenton (ORTIZ et al., 2022). Nessa reação, são utilizados íons de ferro ( $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$ ) e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) para formar radicais livres altamente reativos, capazes de oxidar e degradar poluentes. Além disso, essa reação pode ser realizada de forma biotecnológica, empregando enzimas capazes de sintetizar o peróxido de hidrogênio necessário. Por exemplo, a metabolização da glicose pela glicose oxidase (GOx) ou o uso de álcool oxidases podem gerar o peróxido de hidrogênio necessário. Neste caso, o procedimento denomina-se reação de Bio-Fenton. Essa abordagem oferece a vantagem de reduzir custos e riscos durante a execução do processo (ESKANDARIAN et al., 2014; KAHOUH et al., 2018). Neste capítulo do livro visamos analisar e fazer um levantamento de técnicas físicas, químicas e biológicas para a eliminação de plásticos e microplásticos do ambiente. Essas técnicas visam reduzir os impactos desses elementos sobre os ecossistemas, sendo essenciais para a manutenção da qualidade de vida e do equilíbrio ecossistêmico.

## **2. Metodologia**

Visando a elaboração de um referencial teórico atualizado e com alta qualidade, foi realizada uma busca de artigos científicos e livros nas bases de dados: Pubmed, Web of Science, Google Scholar, e Periódicos Capes. Para tanto, foram utilizados os termos “Biorremediação”, “Microplásticos”, “Biodegradação” e “Degradação microplásticos” (em inglês “Bioremediation”, “Microplastics”, “Biodegradation” e “Degradation microplastics” respectivamente). Com base na pesquisa, foram selecionados apenas os documentos que contemplavam os objetivos propostos pelo presente trabalho, selecionando-se preferencialmente os documentos publicados entre os anos de 2019 e 2024.

### 3. Plásticos, microplásticos e meio ambiente

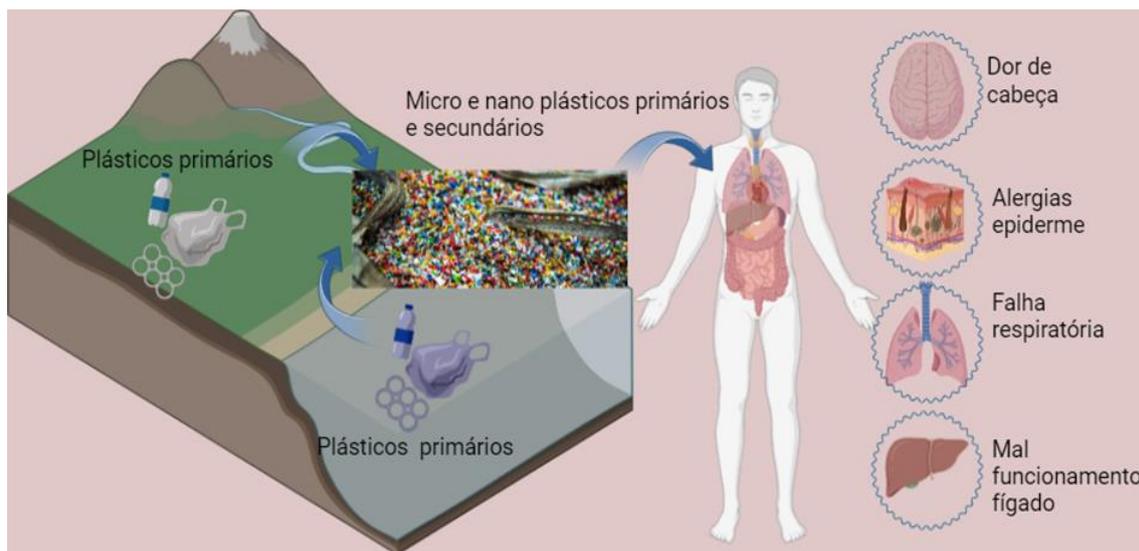
Plásticos são commodities de extrema importância devido às suas amplas aplicações em nossas rotinas, possuindo propriedades únicas. Os plásticos apresentam grande diversidade, são baratos e possuem considerável resistência, força e capacidade de isolamento térmico e elétrico (RU et al., 2020). Plásticos normalmente são compostos sintéticos ou semi-sintéticos orgânicos de alta massa molecular e polímeros com extensas cadeias (SHAH et al., 2008). Os materiais plásticos estão presentes em muitos locais e produtos de nossa rotina diária onde suas características são consideradas vitais para a sociedade moderna. Vários avanços tecnológicos, inclusive na área médica, resultaram em um drástico aumento de sua produção pelas indústrias (ROAGER & SONNINCHEIN, 2019). A produção de plásticos era de 360 milhões de toneladas em 2018, elevou-se para 370 milhões de toneladas em 2019 e 390 milhões de toneladas em 2021, havendo projeções de 450 milhões de toneladas para 2025 e 1.480 milhões de toneladas para 2050 (SHARMA et al., 2020; KUMAR et al., 2021; MADDELA et al., 2023).

O termo microplásticos (MPs) foi proposto por Thompson e colaboradores em 2004. Os MPs são polímeros com diâmetros de 5 mm ou menos enquanto os nanoplásticos (NPs) possuem diâmetros inferiores a 1 nm e têm ganhado atenções na atualidade devido ao seu potencial dano aos ecossistemas (GANESH-KUMAR et al., 2020; ALFARO-NÚÑES et al., 2021). A Figura 1 mostra a classificação dos plásticos, com base nos seus tamanhos (WU et al., 2019).

<b>Megaplástico &gt; 500 mm</b>
<b>Macroplástico 500-50 mm</b>
<b>Mesoplástico 50-5 mm</b>
<b>Microplástico 5-0.001 mm</b>
<b>Nanoplástico &lt; 0.001 mm</b>

**Figura 1.** A classificação de plásticos baseada nos seus tamanhos.

Os MPs chegam ao ambiente através de ações antropogênicas diretas e indiretas: agricultura, empacotamento, aplicações cosméticas, processos industriais e descarte de resíduos, conforme ilustrado pela Figura 2. (SHEN et al., 2022; HUANG et al., 2020) Foram observados microplásticos associados com químicos tóxicos e metais pesados nas águas, eventualmente adentrando as cadeias alimentares e populações animais, ocasionando diversos riscos à saúde (GONG et al., 2018).



**Figura 2.** Origem de alguns micros e nanoplasticos e seus efeitos em humanos

Com base na produção atual e em dados sobre o manejo de descarte, estima-se em 12.000 toneladas a quantidade de resíduos plásticos que estará acumulada em aterros sanitários e no meio ambiente em 2050 (GEYER et al., 2017).

As principais características físico-químicas dos mais abundantes encontrados na natureza são listadas na Tabela 1. A poluição por esses materiais tem se tornado uma das maiores preocupações devido sua ameaça à sustentabilidade ambiental. Por causa de sua natureza recalcitrante, os plásticos sintéticos persistem no ambiente por centenas ou milhares de anos após o descarte, sendo assim, grandes contribuintes para a poluição ambiental (GEWERT et al., 2015, LEE et al., 2021).

**Tabela 1.** Microplásticos mais abundantes e suas principais características físico-químicas.

Plásticos	Principais características físico-químicas
<b>Polietileno (PE)</b>	São estruturados em uma cadeia de carbono larga e linear de poli-oleifina, os microplásticos desse grupo de plástico são categorizados em dois grupos com base em sua densidade, os polietilenos de baixa densidade (LDPE) e polietilenos de alta densidade (HDPE) e suas degradações se dão por duas fases a de despolimerização e mineralização do material (THAKUR et al., 2023).
<b>Polietileno tereftalato (PET)</b>	Consistem em uma estrutura amorfa semi-cristalina em um polímero linear de unidades repetidas de etileno glicol ou ácido tereftálico. Enzimas que atuam sobre são principalmente MHEtase e PETase; alguns trabalhos apresentaram até 97% de degradação de PET (YOSHIDA et al., 2016; ALI et al., 2021a).
<b>Poliestireno (PS)</b>	Polímero aromático sintético de alto peso molecular feito de monômeros de estireno (SHEIKH et al., 2013). Sua biodegradação foi relatada por bactérias, algas e fungos, e diversos microrganismos têm sido reportados como degradadores (MUHONJA et al., 2018; ALI et al., 2021a)
<b>Polipropileno (PP)</b>	Apresentam uma cadeia direta de hidrocarbonetos contendo um átomo de carbono no anel principal da estrutura. São menos estáveis que o PE, mas possuem uma superfície hidrofóbica que os tornam mais recalcitrantes (KHOIRONI et al., 2020; OTHMAN et al., 2021). Em sua degradação ligações C-C e C-H são oxidadas por enzimas secretadas por microrganismos, que quebram longas cadeias em pequenos hidrocarbonetos metabolizados pelos microrganismos a CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O (ZHANG et al., 2022)

#### 4. Origem dos microplásticos

De acordo com sua origem, os microplásticos podem ser classificados em duas categorias principais (GERRITSE et al., 2020; KUMARI et al., 2022): primários e secundários.

#### **4.1. Microplásticos primários**

São partículas de plástico fabricadas já em tamanho microscópico para uso em diversos produtos, como esfoliantes cosméticos, produtos de higiene, tintas, abrasivos industriais e microesferas em medicamentos. Outra fonte importante de microplásticos primários são os pellets de plástico, pequenas resinas de plásticos usadas como matéria-prima na fabricação de produtos plásticos.

#### **4.2. Microplásticos secundários**

São resultantes da degradação de plásticos maiores, como garrafas, sacolas, redes de pesca e outros resíduos plásticos descartados incorretamente. Essa degradação pode ocorrer devido à exposição a agentes ambientais como radiação ultravioleta (UV), mudanças de temperatura, abrasão física ou ação de micro-organismos.

### **5. Perigos para a saúde humana e ambiental**

Os microplásticos têm se tornado uma preocupação crescente devido à sua onipresença em ambientes terrestres e aquáticos, bem como ao seu potencial impacto sobre a saúde humana e ecossistemas.

#### **5.1. Impacto ambiental e sobre a saúde animal**

A presença de microplásticos em ecossistemas marinhos e terrestres é alarmante. Eles são consumidos por diversas espécies, desde o plâncton até peixes e aves, o que pode levar à sua entrada na cadeia alimentar (SANTILLO et al., 2017). Além de causar bloqueios físicos no trato digestivo dos organismos, os microplásticos podem carrear substâncias tóxicas, como aditivos plásticos e poluentes orgânicos persistentes (POPs), aumentando o risco de toxicidade e efeitos biológicos adversos (CARUSO et al., 2019; CHEN et al., 2019; HAHLADAKIS, 2020, HAHLADAKIS et al., 2018; MENÉNDEZ-PEDRIZA et al., 2020).

## 5.2. Impacto sobre a saúde humana

Embora os estudos sobre os efeitos dos microplásticos na saúde humana ainda sejam preliminares, parece certo que há algumas preocupações legítimas. Humanos podem ser expostos aos microplásticos através da ingestão de alimentos contaminados, como peixes e frutos-do-mar, da água potável e até mesmo do ar, uma vez que as partículas de microplásticos podem ser encontradas em poeiras domésticas. Os potenciais riscos incluem efeitos tóxicos devido à presença de aditivos químicos ou poluentes adsorvidos nos microplásticos. Pode-se esperar também reações inflamatórias no caso dos microplásticos serem inalados ou ingeridos em grandes quantidades. Sobretudo a bioacumulação, ou seja, o acúmulo de moléculas tóxicas no organismo, pode aumentar os riscos de doenças crônicas ao longo do tempo (YEE et al., 2021; PRATA et al., 2020; KOELMANS et al., 2019; WRIGHT & KELLY 2017; OLIVEIRA et al., 2019; QIAO et al., 2019).

## 6. Estratégias atuais de manejo de plásticos

As estratégias atuais de manejo dos resíduos plásticos incluem o depósito em aterros sanitários. Isto, no entanto requer grandes superfícies, além de facilitar a produção de MPs através da foto-oxidação. (ALI et al., 2021 a,b). Outra estratégia, a incineração dos resíduos plásticos é efetiva, porém pode gerar resíduos tóxicos como dioxinas e monóxido de carbono (RU et al., 2020; BARDAJÍ et al., 2020). A reciclagem mecânica não tem tido plena aceitação devido à redução de qualidade e performance dos produtos (TSUCHIMOTO & KAJIKAWA 2022). A biodegradação, por outro lado, é considerada o enfrentamento mais “verde” e sustentável frente a essa problemática (QUAN et al., 2023). A biodegradação de plásticos envolve principalmente a ação de enzimas, que são secretadas pelos microrganismos e que facilitam a conversão de resíduos plásticos em moléculas menores ou monômeros (BAHL et al., 2021). Porém, muitos desafios ainda estão presentes no panorama atual da biodegradação de plásticos como a falta de padronização de um método para garantir as habilidades de degradação por microrganismos e enzimas assim como os efeitos de aditivos sintéticos presentes nos materiais plásticos comerciais alvos da biodegradação. A isto deve-se acrescentar a dedicação

limitada que se tem observado no tocante à descoberta e caracterização das enzimas degradadoras de plásticos (THEW et al., 2023).

## 7. Novas técnicas de degradação dos microplásticos

Vários métodos estão sendo investigados para degradar os microplásticos, minimizando seus impactos no meio ambiente. Eles podem ser divididos em três categorias principais: métodos físicos, químicos e biológicos.

**Tabela 2.** Principais métodos físicos e químicos utilizados na degradação dos microplásticos (DIMASSI et al., 2022; XIANG et al., 2023; GUO et al., 2024).

<b>Métodos Físicos</b>	<b>Descrição</b>
<b>Fragmentação</b>	Uso de força mecânica para quebrar plásticos em partículas menores.
<b>Filtração</b>	A água contaminada é passada através de uma malha ou filtro para remover partículas de microplásticos.
<b>Ultrassom</b>	Utilização de ondas sonoras de alta frequência para gerar cavitação e quebrar partículas de microplásticos em tamanhos menores.
<b>Processos Térmicos</b>	Aplicação de calor para derreter ou queimar plásticos, podendo fragmentá-los em tamanhos menores ou convertê-los em gás.
<b>Combustão</b>	Queima de plásticos em um ambiente controlado para reduzir partículas e gerar energia, embora possa resultar em emissões tóxicas.

### 7.1. Métodos físicos e químicos

A degradação física de microplásticos envolve o uso de métodos que fragmentam ou quebram os plásticos em partículas menores, ou facilitam sua remoção do ambiente. Embora não sejam tão eficazes em decompor completamente os plásticos em suas formas mais simples, essas técnicas podem ser combinadas com abordagens químicas ou biológicas para uma maior eficiência. De fato, as técnicas físicas geralmente são usadas em conjunto com métodos químicos ou biológicos para otimizar a degradação dos microplásticos, visando reduzir seu impacto ambiental. A degradação de microplásticos é um

desafio ambiental crescente, e várias técnicas químicas modernas estão sendo desenvolvidas para lidar com esses poluentes. Essas técnicas são promissoras, mas muitas ainda estão em fase experimental, e seus impactos ambientais e econômicos estão sendo avaliados para aplicações em larga escala. As Tabelas 2 e 3 apresentam os principais métodos físicos e químicos, respectivamente, atualmente considerados como promissores para a degradação dos microplásticos.

**Tabela 3.** Principais métodos químicos utilizados na degradação de microplásticos (GUO et al., 2024).

<b>Métodos Químicos</b>	<b>Descrição</b>
<b>Hidrólise</b>	Processo onde água é utilizada para quebrar ligações químicas dos polímeros plásticos, resultando em moléculas menores.
<b>Oxidação química avançada: Reação de Fenton, Foto-Fenton, oxidação eletroquímica, etc</b>	Uso de agentes oxidantes para quebrar as ligações químicas dos plásticos, transformando-os em moléculas menos poluentes.
<b>Pirólise</b>	Processo térmico onde plásticos são decompostos em temperaturas elevadas na ausência de oxigênio, resultando em óleo e gás.
<b>Desorção química</b>	Processos químicos que eliminam poluentes adsorvidos em microplásticos, contribuindo para a sua degradação.
<b>Luz UV</b>	A radiação UV provoca a quebra das ligações químicas nos microplásticos, resultando em sua fragmentação. A exposição prolongada à luz solar ou lâmpadas UV pode acelerar esse processo. Quando associada a catalisadores (como $\text{TiO}_2$ ), a radiação UV não apenas fragmenta, mas também ajuda a oxidar os microplásticos.

## 7.2. Métodos biológicos (biodegradação)

As técnicas biológicas para a degradação de microplásticos envolvem o uso de organismos vivos ou enzimas capazes de quebrar, ou metabolizar os polímeros plásticos em compostos menores e menos prejudiciais ao meio ambiente (BAHL et al., 2021; ANAND et al., 2023). Técnicas biológicas são

promissoras, mas ainda enfrentam desafios relacionados à aplicação em larga escala e ao tempo necessário para que os plásticos sejam completamente degradados. A combinação de métodos biológicos com técnicas químicas ou físicas pode ser a chave para melhorar a eficiência desses processos. Essas abordagens estão em constante evolução, e a seguir descreveremos algumas das mais promissoras e modernas.

### **7.2.1. Degradação por microrganismos**

Nos últimos anos muitas pesquisas têm sido realizadas no campo de biodegradação de plásticos. Os decompositores, microrganismos e comunidades microbianas de aterros sanitários, solo e de oceanos, são os principais escolhidos quando da identificação de potenciais organismos degradadores de plásticos (FACCIA et al., 2021; LIU et al., 2022a). Devido à alta contaminação dos oceanos por plásticos, algumas algas têm demonstrado capacidade em degradar plásticos (HADIYANTO et al., 2022), microrganismos fotossintetizantes (BARONE et al., 2024), assim como insetos e moluscos, apresentam capacidade de digerir plásticos (LIU et al., 2022b; SONG et al., 2020). A degradação de diferentes polímeros (polietileno, polipropileno e poliestireno) por bactérias e fungos de ambientes naturais tem sido investigados, mas a maioria dos estudos têm sido realizados sob condições laboratoriais (WU et al., 2023).

A biodegradação é a conversão bioquímica de compostos por microrganismos (ZHENG et al., 2005) sendo essa comumente considerada uma aproximação mais viável, tanto ambientalmente quanto economicamente, quando comparada a degradação física ou química (QUAN et al., 2023). Bactérias, fungos e outros micróbios podem facilmente colonizar e formar biofilmes na superfície de detritos plásticos o que é chamado de “Plastisfera” (ZETTLER et al., 2013; THAKUR et al., 2023).

Os processos de biodegradação dos plásticos com microrganismos envolvem a formação de biofilmes ou áreas de contato na superfície do polímero, seguido pela secreção de enzimas extracelulares para a fragmentação em partículas menores, muitas vezes transformando polímeros em monômeros.

Partículas menores, por sua vez, podem ser consumidas pelos microrganismos e metabolizadas em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (MOHANAN et al., 2020; SINGH JADAUN et al., 2022; THEW et al., 2023; LAU et al., 2009). Fungos são os microrganismos mais comumente encontrados na plastisfera (De TENDER et al., 2017). No caso dos plásticos como substrato, a estrutura das comunidades fúngicas nos microplásticos (poliestireno e detritos de polietileno) é diferente da de seus substratos naturais como madeira e água (KETTNER et al., 2017). A biodegradação desses é principalmente afetada pelas características dos polímeros e de diversos fatores ambientais. As propriedades físico-químicas dos plásticos (cristalinidade, afinidade para com a água, peso molecular e dureza) são determinantes nos processos de biodegradação (THEW et al., 2023).

A maioria das espécies capazes de biodegradar os plásticos são bactérias (GAMBARINI et al., 2021). *Bacillus* sp. (AUTA et al., 2018); *Rhodococcus* sp. (AUTA et al., 2018) e *Zalerion maritimum* (PAÇO et al., 2017) possuem capacidade de usar materiais poliméricos como fonte principal de carbono em meio de cultura mínimo, conseqüentemente contribuindo para a redução do peso seco dos polímeros e induzindo modificações físico-químicas (PARK & CHANG, 2019). O levantamento feito por Gambarini et al. (2021), revelou que *Bacillus pumilus* é capaz de degradar 14 diferentes tipos de plásticos. Em termos mais amplos, 286 espécies de bactérias apresentaram capacidade de degradar materiais plásticos sendo essas pertencentes a apenas 5 filos dos 31 totais na base de dados do National Center for Biotechnology Information (NCBI). Estes filos são Proteobacteria (30,4%); Actinobacteria (20,3%), Firmicutes (13,8%), Bacteroidetes (0,69%) e Cyanobacteria (0,46%). Alguns plásticos possuem em sua estrutura aditivos que podem inibir o crescimento microbiano (WANG et al., 2015), o que pode causar uma visão subestimada do real potencial dos microrganismos para a degradação de polímeros plásticos puros (GAMBARINI et al., 2021).

Os fungos filamentosos especialmente os gêneros *Aspergillus* spp. e *Penicillium* spp., são as cepas fúngicas mais documentadas como capazes de degradar polímeros plásticos (GAMBARINI et al., 2021). Sua estrutura física, o chamado micélio, tem a capacidade de penetrar a superfície dos plásticos, se estendendo e espalhando no substrato para absorver nutrientes, permitindo ao

fungo fixar-se com firmeza na superfície (SÁNCHEZ, 2020). Os fungos também secretam hidrofobinas que podem amontoar-se, formando membranas de proteínas anfífilas que reforçam a hidrofobicidade da superfície do plástico facilitando a própria colonização da superfície (CICATIELLO et al., 2020; STANZIONE et al., 2022).

As enzimas extracelulares produzidas por fungos, como as peroxidases (manganês peroxidases, lignina peroxidases, peroxidases versáteis), lacases, lipases cutinases (SAHU et al., 2023) e proteases (SRIKANTH et al., 2022), também têm importante função na degradação de plásticos, despolimerizando materiais poliméricos em fragmentos de menor peso molecular. As cutinases (EC 3.1.1.74) são esterases que pertencem à família das hidrolases  $\alpha/\beta$ . Investigações recentes têm evidenciado que as cutinases são enzimas multifuncionais que atuam sobre ésteres solúveis, triglicerídeos insolúveis e tereftalato de polietileno (LIU et al., 2022c). Apesar do estudo inicial ter descoberto que elas podem quebrar a cutina em monômeros de ácidos graxos, isso tem o potencial de torná-las ferramentas importantes para degradação, reciclagem e melhoria do plástico (NIKOLAIVITS et al., 2018). As lacases (EC 1.10.3.2) são uma classe de enzimas conhecidas como oxidases multicobre (BILAL et al., 2019) que utilizam oxigênio como aceptor de elétrons para oxidar compostos fenólicos e não fenólicos. Neste processo elas reduzem o oxigênio molecular a água (SURWASE et al., 2016). De acordo com Tournier et al., (2023) análises demonstram a capacidade das lacases em atuar sobre a estrutura do polietileno e estudos conduzidos por Santacruz-Juárez et al. (2021) demonstram que as oxidases em geral (e.g., lacases) são cruciais para garantir a quebra do poluente (polietileno) com produção de  $H_2O_2$ . O fungo *Cochliobolus* sp., degradou PVC graças às suas lacases (SUMATHI et al., 2016). Bjerkandera adusta TBB-03 apresentou habilidade de degradar um polietileno de alta densidade (HDPE) num substrato ligninocelulósico para a produção de lacase (KANG et al., 2019). As peroxidases (EC 1.11.1) são enzimas universais que catalisam reações redox envolvendo a redução do peróxido e oxidação de substratos que variam de uma classe de peroxidases para a outra. Essas enzimas quando não provenientes de animais são divididas em três classes, a primeira compreende catalase-peroxidases, ascorbato peroxidase, e peroxidase

do citocromo c. A classe 2 engloba as peroxidases detectadas apenas em fungos, sendo essas capazes de degradar lignina. As enzimas da classe 3, finalmente, são encontradas apenas em plantas (TOURNIER et al., 2023). Khatoon et al. (2019) avaliaram a capacidade da lignina peroxidase (EC 1.11.1.14) de *Phanerochaete chrysosporium* na degradação de polímeros sintéticos e concluíram que houve modificações na estrutura do PVC. As lipases (EC 3.1.1.3) são enzimas extracelulares que normalmente clivam e hidrolisam ligações ésteres em óleos e gorduras, podendo “atacar” ligações éster em alguns poliésteres alifáticos possibilitando a despolimerização de tais materiais. Em geral, porém, não são consideradas globalmente como PET hidrolases, mas sim como enzimas modificadoras de superfície (TOURNIER et al., 2023). De acordo com levantamento feito por Temporiti et al. (2022), algumas lipases fúngicas já se revelaram capazes de degradar polietileno tereftalato (PET) e poliuretano (PUR).

Uma estratégia atraente de biorremediação consiste na combinação de diferentes espécies de microrganismos. Com suas diversas enzimas específicas pode-se aumentar a eficiência da degradação dos plásticos. Alguns microrganismos podem atacar as cadeias principais do polímero, por exemplo, enquanto outros transformam os subprodutos que foram gerados (AMOBONYE et al., 2021; CAI et al., 2023; WU et al., 2023). Algumas espécies fúngicas tem mostrado habilidade de absorver nutrientes dos polímeros plásticos, como *Pleurotus abalones*, *P. ostreatus*, *Agaricus bisporus* devido à secreção de enzimas como a lacase, possibilitando o uso de polietileno e poliestireno como fonte de carbono. Isto foi em parte deduzido da observação de que houve crescimento fúngico a partir da degradação do plástico (HOCK et al., 2019). *P. eryngii* e *Lentinula edodes*, demonstraram capacidade de degradar BPA (bisfenol A) e DEHP (ftalato de di-2-etilexila), através da secreção da enzima manganês peroxidase (HOCK et al., 2019). A capacidade de degradar polietileno verde e plásticos oxibiodegradáveis (D2W) sem tratamento físico prévio já foi observada com *P. ostreatus* (LUZ et al., 2013). De acordo com Gambarini et al. (2021), os fungos *Aspergillus fumigatus* e *Phanaerochaete chrysosporium* revelaram possuir capacidade de degradar, respectivamente, 11 e 10 diferentes tipos de plástico.

### **7.2.3. Larvas degradadoras de plásticos**

Graças às bactérias simbióticas presentes em seus sistemas digestivos, algumas espécies de insetos têm demonstrado a capacidade de consumir e degradar plásticos. Exemplos incluem *Galleria mellonella* (larva da traça-da-cera), capaz de consumir polietileno, possivelmente degradando-o através de enzimas presentes em suas bactérias intestinais; *Zophobas morio* (superverme) e *Tenebrio molitor* (larva do besouro), que têm revelado capacidade de biodegradar o poliestireno em seus sistemas digestivos com a ajuda de suas comunidades bacterianas simbióticas; As bactérias encontradas no intestino desses insetos, portanto, desempenham um papel crucial na degradação dos plásticos. Algumas dessas bactérias podem ser isoladas e cultivadas para degradar plásticos em ambientes controlados (BILLEN et al., 2020; LUO et al., 2020; YIN et al., 2020; YANG et al., 2015; ZHANG et al., 2020).

### **7.2.4. Biorremediação assistida por plantas.**

Embora não degradem plásticos diretamente, certas plantas podem ajudar na remoção de microplásticos do ambiente ao capturá-los no solo ou na água. Podem também, em alguns casos, facilitar sua degradação ao criar um ambiente favorável para a colonização de microrganismos degradadores de plástico. Há pesquisas em andamento para modificar geneticamente plantas (plantas transgênicas) para que produzam enzimas degradadoras de plásticos em suas raízes ou no solo circundante, o que poderia acelerar a degradação de microplásticos no ambiente (KUMARI et al., 2022).

## **8. Conclusão**

Os microplásticos representam uma ameaça significativa ao meio ambiente e à saúde humana. Suas fontes são diversas, incluindo produtos de consumo e a degradação de resíduos plásticos maiores. As estratégias para mitigar os impactos dos microplásticos ainda estão em fase de pesquisa, com uma combinação de métodos físicos, químicos e biológicos sendo desenvolvidos para promover sua degradação. A conscientização sobre o uso de plásticos e a promoção de alternativas sustentáveis especialmente associadas à reciclagem

são igualmente cruciais para reduzir a produção e disseminação desses poluentes.

## 9. Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da CAPES, CNPq, Fundação Araucária, Universidade Estadual de Maringá e UNICESUMAR.

## 10. Referências

ALFARO-NÚÑEZ, Alonzo. et al. Microplastic pollution in seawater and marine organisms across the Tropical Eastern Pacific and Galápagos. *SCIENTIFIC REPORTS* 2021; 11(1): p. 6424. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85939-3>

ALI, Sameh S. et al. Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2021a; 780:146590. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590>.

ALI, Sameh Samir. et al. Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2021b; 771: p. 144719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144719>.

AMOBONYE, Ayodeji. et al. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2021; 759: 143536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>.

ANAND, Utpal. et al. Biotechnological methods to remove microplastics: a review. *ENVIRONMENTAL CHEMISTRY LETTERS* 2023; 21(3): 1787–1810. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01552-4>.

AUTA, Helen Shnada. et al. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *MARINE POLLUTION BULLETIN* 2018; 127:15–21. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>.

BAHL, Shashi. et al. Biodegradation of plastics: A state of the art review. *MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS* 2021; 39:31–34. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.096>.

BARDAJÍ, Danae Kala Rodríguez. et al. A mini-review: current advances in polyethylene biodegradation. *WORLD JOURNAL OF MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY* 2020; 36(2):32. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-2808-5>.

BARONE, Giovanni Davide. et al. Harnessing photosynthetic microorganisms for enhanced bioremediation of microplastics: A comprehensive review.

ENVIRONMENTAL SCIENCE AND ECOTECHNOLOGY 2024; 20:100407.  
<https://doi.org/10.1016/j.es.2024.100407>.

BILAL, Muhammad. et al. Hazardous contaminants in the environment and their laccase-assisted degradation – A review. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT 2019; 234: 253–264.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.001>.

BILLEN, Pieter. et al. Technological application potential of polyethylene and polystyrene biodegradation by macro-organisms such as mealworms and wax moth larvae. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 2020; 735: 139521.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139521>.

CAI, Zeming. et al. Biological degradation of plastics and microplastics: A recent perspective on associated mechanisms and influencing factors. MICROORGANISMS 2023; 11(7): 1661.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11071661>.

CARUSO, Gabriella. Microplastics as vectors of contaminants. MARINE POLLUTION BULLETIN 2019; 146:921–924.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.052>.

CHEN, Qiqing. et al. Marine microplastics bound dioxin-like chemicals: Model explanation and risk assessment. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS 2019; 364:82–90. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.032>.

CICATIELLO, Paola. et al. Spotlight on class i hydrophobins: their intriguing biochemical properties and industrial prospects. GRAND CHALLENGES IN FUNGAL BIOTECHNOLOGY 2020; 333–347. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29541-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29541-7_12).

DA LUZ, José Maria Rodrigues. et al. Degradation of Oxo-Biodegradable Plastic by *Pleurotus ostreatus*. PLoS ONE 2013; 8(8): p. e69386.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069386>.

DE TENDER, Caroline. et al. Temporal Dynamics of Bacterial and Fungal Colonization on Plastic Debris in the North Sea. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY 2017; 51(13): 7350–7360.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00697>.

DE-LA-TORRE, Gabriel Enrique. et al. Micro- and mesoplastic pollution along the coast of Peru. ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH 2023; 30(27): 71396–71408. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27707-6>.

DIMASSI, Sarra N. et al. Degradation-fragmentation of marine plastic waste and their environmental implications: A critical review. ARABIAN JOURNAL OF CHEMISTRY 2022; 15(11): 104262.  
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104262>.

EFSA. Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. EFSA JOURNAL 2016; 14(6).  
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4501>.

EKANAYAKA, Anusha H. et al. A review of the fungi that degrade plastic. *JOURNAL OF FUNGI* 2022; 8(8): 772. <https://doi.org/10.3390/jof8080772>.

ESKANDARIAN, Mohammadreza. et al. Bio-Fenton process for Acid Blue 113 textile azo dye decolorization: characteristics and neural network modeling. *DESALINATION AND WATER TREATMENT* 2014; 52(25–27):4990–4998. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.810325>.

FACCIA, Paula A. et al. Degradability of poly(ether-urethanes) and poly(ether-urethane)/acrylic hybrids by bacterial consortia of soil. *INTERNATIONAL BIODETERIORATION & BIODEGRADATION* 2021; 160: 105205. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105205>.

GAMBARINI, Victor. et al. Phylogenetic Distribution of Plastic-Degrading Microorganisms. *MSYSTEMS* 2021; 6(1). <https://doi.org/10.1128/mSystems.01112-20>.

GANESH KUMAR A. et al. Review on plastic wastes in marine environment – Biodegradation and biotechnological solutions. *MARINE POLLUTION BULLETIN* 2020; 150. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110733>.

GERRITSE, Jan. et al. Fragmentation of plastic objects in a laboratory seawater microcosm. *SCIENTIFIC REPORTS* 2020; 10(1): 10945. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67927-1>.

GESAMP. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment (Kershaw, P. J., ed.). IMO/ FAO/UNESCO IOC/UNIDO/WMO/IAEA/ UN/UNEP/UNDP Joint group of experts on the scientific aspects of marine environmental protection. Reports and studies GESAMP 93:96. 2015

GEWERT, Berit. et al. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *ENVIRONMENTAL SCIENCE: PROCESSES & IMPACTS* 2015; 17(9): 1513–1521. <https://doi.org/10.1039/C5EM00207A>.

GEYER, Roland. et al. Production, use, and fate of all plastics ever made. *SCIENCE ADVANCES* 2017; 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.

GONG, Jixian. et al. Biodegradation of Microplastic Derived from Poly (ethylene terephthalate) with Bacterial Whole-Cell Biocatalysts. *POLYMERS* 2018; 10(12): 1326. <https://doi.org/10.3390/polym10121326>.

GUO, Shuli. et al. Microplastic, a possible trigger of landfill sulfate reduction process. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2024; 906:167662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167662>.

HADIYANTO, Hadiyanto. et al. The effect of salinity on the interaction between microplastic polyethylene terephthalate (PET) and microalgae *Spirulina* sp. *ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH* 2022; 29(5): 7877–7887. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16286-z>.

HAHLADAKIS, John N. Delineating the global plastic marine litter challenge: clarifying the misconceptions. *ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT* 2020; 192(5): 267. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8202-9>.

HAHLADAKIS, John N. et al. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS* 2018; 344:179–199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>

HOCK, Ong. et al. The growth and laccase activity of edible mushrooms involved in plastics degradation. *CURRENT TOPICS IN TOXICOLOGY* 2019; 15: p. 57-62.

[https://www.researchgate.net/publication/335145713\\_The\\_growth\\_and\\_laccase\\_activity\\_of\\_edible\\_mushrooms\\_involved\\_in\\_plastics\\_degradation](https://www.researchgate.net/publication/335145713_The_growth_and_laccase_activity_of_edible_mushrooms_involved_in_plastics_degradation) (acessado em 29 de setembro de 2024)

HUANG, Yi. et al. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *ENVIRONMENTAL POLLUTION* 2020; 260: 114096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>.

ISLAM, Mohammad S. et al How microplastics are transported and deposited in realistic upper airways? *PHYSICS OF FLUIDS* 2023; 35(6): 063319. <https://doi.org/10.1063/5.0150703>.

KAHOUSH, May. et al. Bio-Fenton and Bio-electro-Fenton as sustainable methods for degrading organic pollutants in wastewater. *PROCESS BIOCHEMISTRY* 2018; 64: p. 237-247. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.10.003>.

KANG, Bo Ram. et al. Accelerating the biodegradation of high-density polyethylene (HDPE) using *bjerkandera adusta* TBB-03 and lignocellulose substrates. *MICROORGANISMS* 2019; 7(9): 304. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7090304>.

KARAMI, Ali. et al. Microplastic and mesoplastic contamination in canned sardines and sprats. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2018; 612: 1380–1386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.005>.

KARAMI, Ali. et al. Virgin microplastics cause toxicity and modulate the impacts of phenanthrene on biomarker responses in African catfish (*Clarias gariepinus*). *ENVIRONMENTAL RESEARCH* 2016; 151: 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.024>.

KASMURI, Norhafezah. et al. Occurrence, impact, toxicity, and degradation methods of microplastics in environment—a review. *ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH* 2022; 29(21): 30820–30836. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18268-7>.

KETTNER, Marie Therese. et al. Microplastics alter composition of fungal communities in aquatic ecosystems. *ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY* 2017. 19(11): 4447–4459. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13891>.

KHATOON, Nazia. et al. Lignin peroxidase isoenzyme: a novel approach to biodegrade the toxic synthetic polymer waste. *ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY* 2019; 40(11): 1366–1375. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1422550>.

KHOIRONI, Adian. et al. Evaluation of polypropylene plastic degradation and microplastic identification in sediments at Tambak Lorok coastal area, Semarang, Indonesia. *MARINE POLLUTION BULLETIN* 2020; 151: p. 110868. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110868>

KOELMANS, Albert A. et al. Risks of plastic debris: Unravelling fact, opinion, perception, and belief. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* 2017; 51(20): p. 11513–11519. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02219>.

KOELMANS, B.; PAHL, S.; BACKHAUS, T.; BESSA, F.; VAN CALSTER, G.; CONTZEN, N.; CRONIN, R.; GALLOWAY, T.; HART, A.; HENDERSON, L. A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society; SAPEA: Berlin, Germany, 2019.

KUMAR, Rakesh. et al. Impacts of plastic pollution on ecosystem services, sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions. *SUSTAINABILITY* 2021; 13(17):9963. <https://doi.org/10.3390/su13179963>.

KUMARI, Arpna. et al. Microplastic pollution: an emerging threat to terrestrial plants and insights into its remediation strategies. *PLANTS* 2022; 11(3): 340. <https://doi.org/10.3390/plants11030340>.

LAN, Tao. et al. A comparative study on the adsorption behavior of pesticides by pristine and aged microplastics from agricultural polyethylene soil films. *ECOTOXICOLOGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY* 2021; 209: p. 111781. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111781>.

LAU, A.K. et al. Degradation of greenhouse twines derived from natural fibers and biodegradable polymer during composting. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT* 2009; 90(1): 668–671. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.03.001>.

LEE, Jechan. et al. Chemical recycling of plastic waste via thermocatalytic routes. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 2021; 321:128989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128989>.

LIU, Guangzhou. et al. Sorption behavior and mechanism of hydrophilic organic chemicals to virgin and aged microplastics in freshwater and seawater. *ENVIRONMENTAL POLLUTION* 2019; 246: 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.100>.

LIU, Jiawei. et al. Biodegradation of polyether-polyurethane foam in yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome. *CHEMOSPHERE* 2022a; 304:135263. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135263>.

LIU, Xianrui. et al. Rapid colonization and biodegradation of untreated commercial polyethylene wrap by a new strain of *Bacillus velezensis* C5. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT* 2022b; 301:113848. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113848>.

LIU, Zhanzhi. et al. Enhancement of PET biodegradation by anchor peptide-cutinase fusion protein. *ENZYME AND MICROBIAL TECHNOLOGY* 2022c; 156: p. 110004. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2022.110004>.

LUO, Liping. et al. Biodegradation of foam plastics by *Zophobas atratus* larvae (Coleoptera: Tenebrionidae) associated with changes of gut digestive enzymes activities and microbiome. *CHEMOSPHERE* 2021; 282: 131006. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131006>.

LUSHER, A. L. et al. (2017). Microplastics in fisheries and aquaculture: Status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. *FAO FISHERIES AND AQUACULTURE TECHNICAL PAPER* 2017; (615). [https://www.researchgate.net/publication/319644050\\_Microplastics\\_in\\_fisheries\\_and\\_aquaculture\\_Status\\_of\\_knowledge\\_on\\_their\\_occurrence\\_and\\_implications\\_for\\_aquatic\\_organisms\\_and\\_food\\_safety](https://www.researchgate.net/publication/319644050_Microplastics_in_fisheries_and_aquaculture_Status_of_knowledge_on_their_occurrence_and_implications_for_aquatic_organisms_and_food_safety) (acessado em 29 de setembro de 2024).

MADDELA, Naga Raju. et al. Additives of plastics: Entry into the environment and potential risks to human and ecological health. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT* 2023; 348: 119364. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119364>.

MENÉNDEZ-PEDRIZA, Albert. et al. Interaction of Environmental Pollutants with Microplastics: A Critical Review of Sorption Factors, Bioaccumulation and Ecotoxicological Effects. *TOXICS* 2020; 8(2):40. <https://doi.org/10.3390/toxics8020040>.

MILOLOŽA, Martina. et al. Biotreatment strategies for the removal of microplastics from freshwater systems. A review. *ENVIRONMENTAL CHEMISTRY LETTERS* 2022; 20(2): p. 1377–1402. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01370-0>.

MOHANAN, Nisha. et al. Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. *FRONTIERS IN MICROBIOLOGY* 2020; 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.580709>.

MUHONJA, Christabel Ndahebwa. et al. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLOS ONE* 2018; 13(7): p. e0198446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>.

NIKOLAIVITS, Efstratios. et al. A Middle-Aged Enzyme Still in Its Prime: Recent Advances in the Field of Cutinases. *CATALYSTS* 2018; 8(12): p. 612. <https://doi.org/10.3390/catal8120612>.

OLIVEIRA, M. et al. A micro(nano)plastic boomerang tale: A never ending story? *TRENDS IN ANALYTICAL CHEMISTRY* 2019; 112: p. 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.01.005>.

ORTIZ, David. et al. Insights into the degradation of microplastics by Fenton oxidation: From surface modification to mineralization. *CHEMOSPHERE* 2022; 309: 136809. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136809>.

OTHMAN, Ahmad Razi. et al. Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. *ENVIRONMENTAL CHEMISTRY LETTERS* 2021; 19(4): p. 3057–3073. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01197-9>.

PAÇO, Ana. et al. Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2017; 586:10–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.017>.

PARK, Seon Yeong. et al. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *CHEMOSPHERE* 2019; 222: 527–533. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>.

PRATA, Joana Correia. et al. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2020; 702: p. 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>.

QIAO, Ruxia. et al. Microplastics induce intestinal inflammation, oxidative stress, and disorders of metabolome and microbiome in zebrafish. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2019; 662:246–253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.245>.

QIN, Meng. et al. A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: Another ecological threat to soil environments? *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 2021; 312: p. 127816. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127816>.

QUAN, Zhaolin. et al. Biodegradation of polystyrene microplastics by superworms (larve of *Zophobas atratus*): Gut microbiota transition, and putative metabolic ways. *CHEMOSPHERE* 2023; 343: p. 140246. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140246>.

ROAGER, Line. et al. Bacterial candidates for colonization and degradation of marine plastic debris. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* 2019; 53(20):11636–11643. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02212>.

RU, Jiakang. et al. Microbial Degradation and Valorization of Plastic Wastes. *FRONTIERS IN MICROBIOLOGY* 2020; 11: 21. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00442>.

SAHU, Sudarshan. et al. A review on cutinases enzyme in degradation of microplastics. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT* 2023; 347: p. 119193 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119193>.

SÁNCHEZ, Carmen. Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: An overview of macro- and microplastics biodegradation. *BIOTECHNOLOGY ADVANCES* 2020; 40: p. 107501. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107501>.

SANTACRUZ-JUÁREZ, Ericka. et al. Fungal enzymes for the degradation of polyethylene: Molecular docking simulation and biodegradation pathway proposal. *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS* 2021; 411: p. 125118. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125118>.

SANTILLO, David. et al. Microplastics as contaminants in commercially important seafood species. *INTEGRATED ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AND MANAGEMENT* 2017; 13(3): p. 516–521. <https://doi.org/10.1002/ieam.1909>.

SAPEA, Science Advice for Policy by European Academies. *A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society*. Berlin: SAPEA. 2019 <https://doi.org/10.26356/microplastics>.

SHAH, Aamer Ali. et al. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *BIOTECHNOLOGY ADVANCES* 2008; 26(3): 246–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>.

SHARMA, Madhu D. et al. Assessment of cancer risk of microplastics enriched with polycyclic aromatic hydrocarbons. *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS* 2020; 398: p. 122994. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122994>.

SHEN, Maocai. et al. Microplastics in landfill and leachate: Occurrence, environmental behavior and removal strategies. *CHEMOSPHERE* 2022; 305:135325. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135325>.

SINGH JADAUN, Jyoti. et al. Biodegradation of plastics for sustainable environment. *BIORESOURCE TECHNOLOGY* 2022; 347: p. 126697. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126697>.

SONG, Yang. et al. Biodegradation and disintegration of expanded polystyrene by land snails *Achatina fulica*. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2020; 746: p. 141289. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141289>.

SRIKANTH, Munuru. et al. Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *BIORESOURCES AND BIOPROCESSING* 2022; 9(1): p. 42. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>.

STANZIONE, Ilaria. et al. Innovative surface bio-functionalization by fungal hydrophobins and their engineered variants. *FRONTIERS IN MOLECULAR BIOSCIENCES* 2022;9. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2022.959166>.

SUMATHI, Tirupati. et al. Production of laccase by *cochliobolus* sp. isolated from plastic dumped soils and their ability to degrade low molecular weight PVC. *BIOCHEMISTRY RESEARCH INTERNATIONAL* 2016; 2016: 1–10. <https://doi.org/10.1155/2016/9519527>.

SURWASE, Swati V. et al. Interaction of small molecules with fungal laccase: A Surface Plasmon Resonance based study. *ENZYME AND MICROBIAL TECHNOLOGY* 2016; 82: p. 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2015.09.002>.

TEMPORITI, Marta Elisabetta Eleonora. et al. Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. *MICROORGANISMS* 2022; 10(6): p. 1180. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061180>.

THAKUR, Babita. et al. Biodegradation of different types of microplastics: Molecular mechanism and degradation efficiency. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2023; 877: p. 162912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162912>.

THEW, Crystal Xue Er. et al. Recent advances and challenges in sustainable management of plastic waste using biodegradation approach. *BIORESOURCE TECHNOLOGY* 2023; 374: p. 128772. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128772>.

THOMPSON, Richard C. et al. Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *SCIENCE* 2004; 304(5672): p. 838–838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>.

TOURNIER, Vincent. et al. Enzymes' Power for Plastics Degradation. *CHEMICAL REVIEWS* 2023; 123(9): p. 5612–5701. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00644>

TSUCHIMOTO, Ichiro. et al. Recycling of Plastic Waste: A Systematic Review Using Bibliometric Analysis. *SUSTAINABILITY* 2022; 14(24): p. 16340. <https://doi.org/10.3390/su142416340>.

WANG, Hao. et al. Soil burial biodegradation of antimicrobial biodegradable PBAT films. *POLYMER DEGRADATION AND STABILITY* 2015; 116: 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2015.03.007>.

WANG, Shutao. et al. Biodegradation of decabromodiphenyl ethane (DBDPE) by white-rot fungus *Pleurotus ostreatus*: Characteristics, mechanisms, and toxicological response. *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS* 2022; 424. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127716>.

WANG, Yi. et al. Biodegradable Microplastics: A Review on the Interaction with Pollutants and Influence to Organisms. *BULLETIN OF ENVIRONMENTAL CONTAMINATION AND TOXICOLOGY* 2022; 108(6): p. 1006–1012. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03486-7>.

WRIGHT, Stephanie L. et al. Plastic and Human Health: A Micro Issue? *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* 2017; 51(12): 6634–6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>.

WU, Panfeng. et al. Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. *ECOTOXICOLOGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY* 2019; 184: p. 109612. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109612>.

WU, Zeyu. et al. Biodegradation of conventional plastics: Candidate organisms and potential mechanisms. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2023; 885: p. 163908. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163908>.

XIANG, Peng. et al. Systematic Review of Degradation Processes for Microplastics: Progress and Prospects. *SUSTAINABILITY* 2023; 15(17): p. 12698. <https://doi.org/10.3390/su151712698>.

YANG, Yu. et al. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* 2015; 49(20): p. 12087–12093. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02663>.

YEE, Maxine Swee-Li. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. *NANOMATERIALS* 2021; 11(2): p. 496. <https://doi.org/10.3390/nano11020496>.

YIN, Chao-Fan. et al. Biodegradation of polyethylene mulching films by a co-culture of *Acinetobacter* sp. strain NyZ450 and *Bacillus* sp. strain NyZ451 isolated from *Tenebrio molitor* larvae. *INTERNATIONAL BIODETERIORATION & BIODEGRADATION* 2020; 155: p. 105089. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105089>.

YOSHIDA, Shosuke. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *SCIENCE* 2016; 351(6278): p. 1196–1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>.

ZETTLER, Erik R. et al. Life in the “Plastisphere”: Microbial Communities on Plastic Marine Debris. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* 2013; 47(13): p. 7137–7146. <https://doi.org/10.1021/es401288x>.

ZHANG, Junqing. et al. Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth *Galleria mellonella*. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2020; 704: p. 135931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135931>.

ZHANG, Kai. et al. Microplastic pollution in China’s inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2018; 630: p. 1641–1653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.300>.

ZHANG, Ni. et al. Current Advances in Biodegradation of Polyolefins. *MICROORGANISMS* 2022; 10(8): p. 1537. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081537>.

ZHENG, Ying. et al. A Review of Plastic Waste Biodegradation. *CRITICAL REVIEWS IN BIOTECHNOLOGY* 2005; 25(4), p. 243–250. <https://doi.org/10.1080/07388550500346359>.

## **Autores**

Luís Felipe Oliva dos Santos<sup>1</sup>, Thaís Marques Uber<sup>2</sup>, Vinícius Mateus Salvatori Cheute<sup>2</sup>, José Rivaldo dos Santos Filho<sup>2</sup>, Rúbia Carvalho Gomes Corrêa<sup>3</sup>, Cristina Giatti Marques de Souza<sup>2</sup>, Rafael Castoldi, Adelar Bracht<sup>2</sup>, Rosane Marina Peralta<sup>4</sup>

1. Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.
2. Programa de Pós-graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.
3. Programa de Pós-graduação em Tecnologias Limpas, Universidade Cesumar, Maringá, Brasil.
4. Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Programa de Pós-graduação em Bioquímica, Laboratório de Bioquímica de Microrganismos e Alimentos, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.