

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE FILMES PLÁSTICOS DE EMBALAGEM CONSIDERANDO IMPACTOS AMBIENTAIS DE MICROPLÁSTICOS

**LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PLASTIC PACKAGING FILMS CONSIDERING
ENVIRONMENTAL IMPACTS OF MICROPLASTICS**

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 08/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/788648182](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/788648182)

Pablo Steven Rodrigues Rios¹

Marcell Mariano Corrêa Maceno²

Jessé Marques da Silva Júnior Pavão

RESUMO

Este estudo teve como objetivo realizar uma análise comparativa do potencial impacto ambiental de filmes plásticos para embalagens (PEAD, PEBD, PET e PP) por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), com foco especial na liberação de microplásticos no ecossistema marinho. O escopo da ACV foi "do berço ao túmulo", estabelecendo como unidade funcional a embalagem para uma porção de hortifrúti (25 cm x 50 cm x 200 µm). Avaliaram-se três cenários de descarte final (reciclagem, aterro sanitário e descarte a céu aberto) utilizando o software OpenLCA e as metodologias ReCiPe 2016 e MarILCA. A pesquisa desenvolveu-se em três etapas: análise comparativa geral pelo método ReCiPe, cálculo dos efeitos físicos dos microplásticos na biota, e a integração destes efeitos nos indicadores de qualidade do ecossistema. Os resultados apontaram o PET como o polímero de maior impacto geral (liderando em 15 de 18 categorias), seguido pelo PEBD. Nas simulações de fragmentação de microplásticos (10%, 50% e 100%), o PET e o PEAD revelaram-se os mais prejudiciais à biota marinha. Destaca-se que, no cenário médio (50% de fragmentação), os efeitos físicos na biota representaram mais de 57% do impacto total na qualidade do ecossistema. Conclui-se que os impactos causados pelos microplásticos são altamente relevantes, evidenciando a urgência de avanços em categorias de impacto metodológicas que quantifiquem essa poluição para avaliações ambientais mais realistas e abrangentes.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Microplásticos; Embalagens plásticas; Efeitos na biota; Qualidade do ecossistema.

ABSTRACT

This study aimed to conduct a comparative analysis of the potential environmental impact of plastic packaging films (HDPE, LDPE, PET, and PP) using Life Cycle Assessment (LCA), with a special focus on

the release of microplastics into the marine ecosystem. The LCA scope was "cradle-to-grave," establishing the packaging for a portion of fresh produce (25 cm x 50 cm x 200 µm) as the functional unit. Three end-of-life scenarios (recycling, landfilling, and open dumping) were evaluated using OpenLCA software and the ReCiPe 2016 and MarILCA methodologies. The research was carried out in three stages: a general comparative analysis using the ReCiPe method, calculation of the physical effects of microplastics on biota, and the integration of these effects into ecosystem quality indicators. The results identified PET as the polymer with the highest overall impact (ranking highest in 15 out of 18 categories), followed by LDPE. In the microplastic fragmentation simulations (10%, 50%, and 100%), PET and HDPE proved to be the most harmful to marine biota. Notably, in the intermediate scenario (50% fragmentation), physical effects on biota accounted for over 57% of the total impact on ecosystem quality. The study concludes that the impacts caused by microplastics are highly significant, highlighting the urgent need for advancements in methodological impact categories that quantify this pollution to enable more realistic and comprehensive environmental assessments.

Keywords: Life Cycle Assessment; Microplastics; Plastic packaging; Effects on biota; Ecosystem quality.

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos plásticos são uma constante preocupação para a humanidade, pois o acúmulo em uma escala sem precedentes causa graves danos ao meio ambiente e à saúde humana [1].

Devido à sua natureza recalcitrante, os polímeros termoplásticos tornam-se altamente resistentes à biodegradação, o que representa

uma grande preocupação para o meio ambiente. Quando descartados, esses resíduos se acumulam por longos períodos, constituindo uma enorme ameaça para o ecossistema e, conseqüentemente, para a saúde humana [2].

Os polímeros termoplásticos representam uma categoria reciclável de materiais, desde que haja uma gestão apropriada de descarte e coleta seletiva [3]. Seu uso abrange uma vasta gama de aplicações, incluindo a produção de brinquedos, utensílios domésticos, peças automotivas, construção civil, eletrodomésticos, dispositivos médico-hospitalares, tubos e conexões, mangueiras, revestimentos de cabos, embalagens, filmes plásticos, sacolas, componentes para indústria naval e aeronáutica, instrumentos musicais, têxteis, calçados, artigos infantis, sinalização viária e bijuterias, entre outros [4].

Dentre os exemplos de polímeros termoplásticos, destacam-se o PET (Polietileno Tereftalato), PEAD (Polietileno de Alta Densidade), PEBD (Polietileno de Baixa Densidade) e PP (Polipropileno) [5]. Tal processo de degradação pode ser desencadeado por diversos fatores físicos e químicos, incluindo radiação ultravioleta, atividades mecânicas e hidrólise. [5, 6 e 7]. Essas partículas surgem involuntariamente durante a produção e degradação de produtos de origem plástica, e têm a capacidade de se acumular no ambiente, especialmente nos oceanos [8]. As micropartículas (MPs) são partículas derivadas da decomposição de objetos plásticos. [5, 6 e 7]

Adicionalmente, as minúsculas partículas plásticas liberam aditivos prejudiciais e têm a capacidade de adsorver uma variedade de produtos químicos, atuando como reservatórios para substâncias tóxicas, o que eleva sua biodisponibilidade, toxicidade e capacidade

de dispersão [9]. Os impactos adversos dessas partículas na flora e fauna são significativos [10]. A crescente disseminação dessas partículas em diversos ecossistemas suscita sérias preocupações ambientais [11]. Além disso, os microplásticos podem afetar a saúde humana, uma vez que podem ser ingeridos ou inalados, perturbando o microbioma intestinal [12].

Existem indícios de que tais partículas podem ser transferidas ao longo da cadeia alimentar para seres humanos e outras espécies superiores, após serem ingeridas por organismos situados em níveis tróficos inferiores. Nesse caso, elas podem causar alterações fisiológicas, inflamações, cicatrizes, fibrose e até mesmo câncer [13]. Os microplásticos, de tamanho superior aos nanoplásticos, podem ser incorporados em certos produtos de uso cotidiano, como esfoliantes para pele e outros produtos [14]. Estes liberam os microplásticos no meio ambiente, ocasionando a absorção dos mesmos por organismos vivos. Essas partículas podem representar uma ameaça considerável tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana. Em suma, o impacto dos microplásticos reverbera por todo o ecossistema [15].

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica utilizada para examinar os impactos ambientais potenciais de produtos e sistemas de produção [16]. Afirma que ela engloba todas as etapas de fabricação de produtos, desde a seleção de matérias-primas até a sua disposição final [17].

[18] defende que a Avaliação do Ciclo de Vida permite quantificar e analisar os principais impactos dos microplásticos e nanoplásticos no ecossistema terrestre e marinho. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) enfrenta diversos desafios ao calcular o impacto gerado pelo

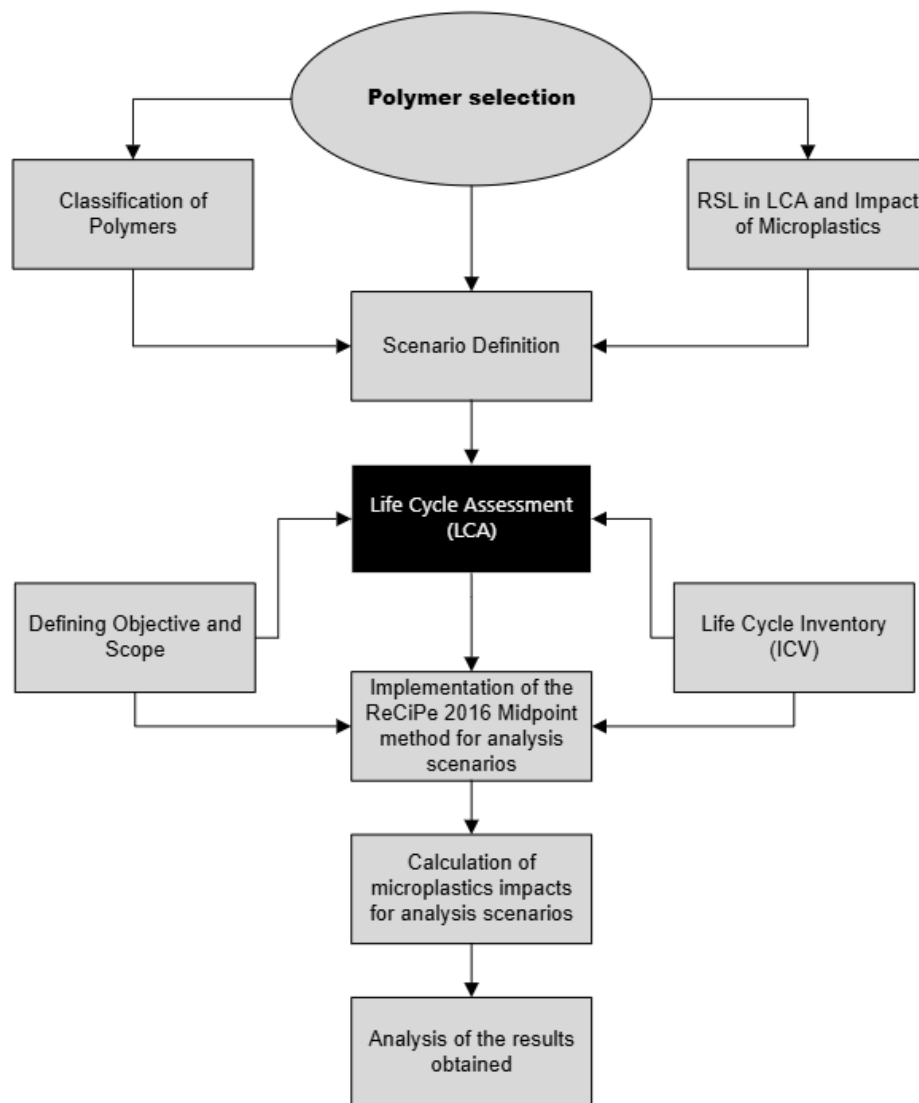
plástico em fase de decomposição, com a liberação de microplásticos no meio ambiente [19]. Apontam a escassez de informações precisas, confiáveis e padronizadas sobre as principais fontes de emissões, distribuição, transporte e destino dessas partículas poliméricas no ecossistema [20].

Além disso, [21] reitera a afirmação de outros autores, destacando a complexidade e variação dos processos físicos, químicos e principalmente biológicos, que afetam toda a atmosfera terrestre e, de maneira particular, o ambiente aquático, em virtude da liberação de microplásticos dispersos no ambiente, abrangendo diversos efeitos ocasionados em vários setores ecológicos, incluindo ambientes rurais e marinhos [22]. Apesar de existirem desafios em relação à quantificação do impacto ambiental de microplásticos, [23] defendem que é imperativo levar em consideração a repercussão ambiental desses materiais. Consequentemente, a pesquisa buscou responder a seguinte problemática: Como avaliar comparativamente o impacto ambiental de filmes plásticos de embalagem por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerando o impacto ambiental potencial do microplásticos?

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – ETAPAS DE ESTUDO

Este estudo teve como foco principal avaliar o impacto ambiental potencial de embalagens de filmes plásticos por meio da ACV, e considerando os impactos ambientais potenciais de microplásticos. Neste sentido, as etapas de pesquisa são apresentadas na **FIGURA 1**, sendo posteriormente detalhadas nos tópicos 3.2.1 ao 3.2.9.

Figura 1. Etapas de Pesquisa



Fonte: (Os Autores, 2026)

A seleção de polímeros foi baseada em dois critérios: a produção industrial de termoplásticos para embalagens e o potencial de liberação de microplásticos, conforme referência de Berry (2023). Para a pesquisa, foram usados dados dos principais polímeros pós-consumo gerados no Brasil em 2023, segundo a ABIPLAST. Juntos, os polímeros de maior volume – PEBD (33%), PP (20%), PET (18%) e PEAD (15%) – representaram 86% de todo o resíduo plástico do país (Picplast, 2024).

2.1. Revisão Sistemática de Literatura

De modo a possibilitar a identificação e seleção das categorias de impacto a serem consideradas para o cálculo do impacto ambiental

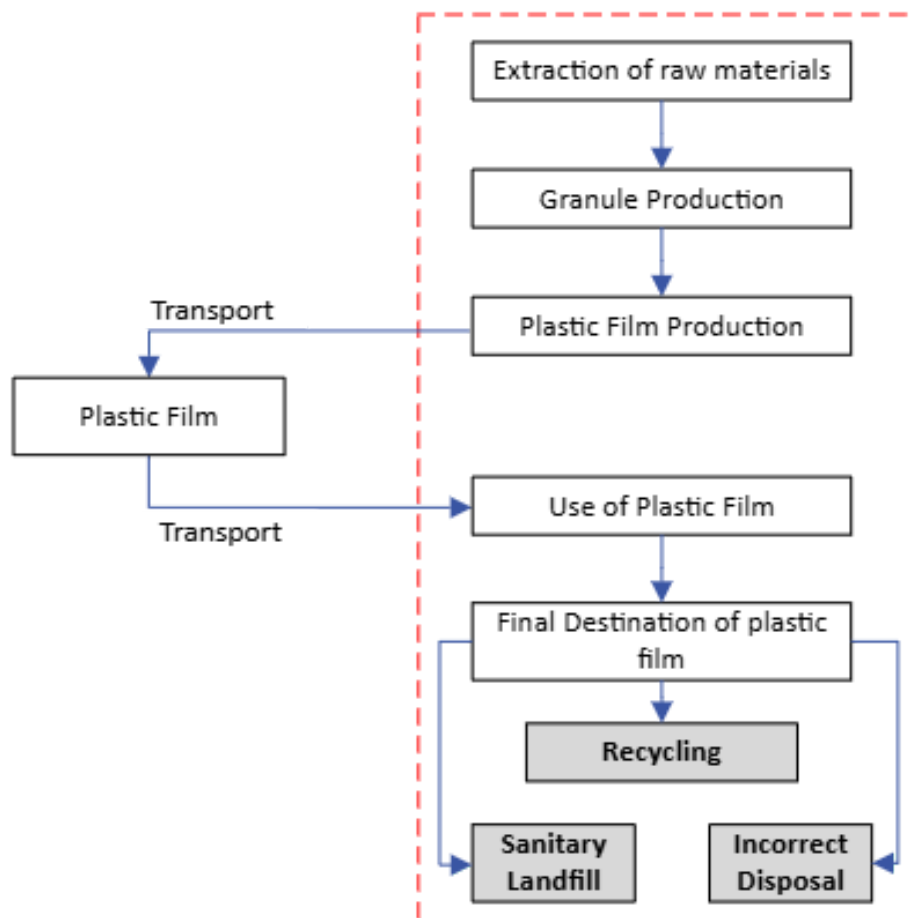
potencial dos microplásticos, foi realizada uma RSL, que foi publicada no evento - 13th International Workshop on Advances in Cleaner Production (IWACP 2024). Como resultado da RSL, foram identificadas oito categorias de impacto, sendo elas: efeitos físicos na biota – ambiente água doce, efeitos físicos na biota – ambiente marinho, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade marinha, toxicidade humana, emaranhamento, asfixia, lesões internas e morte (Rios *et al.* 2024).

A categoria de impacto que foi selecionada para utilização nesta dissertação foi a de efeitos físicos na biota – ambiente marinho. A categoria de efeitos físicos na biota – ambiente água doce, não foi utilizada, considerando a mesma premissa adotada por Quantis e EA (2020), que define que o compartimento final da poluição plástica que é despejada em corpos hídricos acaba se depositando nos oceanos. Já as demais categorias não foram utilizadas, pois não foram encontrados na literatura fatores de caracterização que dessem suporte ao cálculo do potencial de impacto ambiental de microplásticos.

2.2. Definição de Cenários

O fluxograma de processos dos polímeros apresentado na figura 8 ilustra o ciclo de vida dos 4 polímeros analisados neste estudo, sendo eles: O Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), Polietileno de Tereftalato (PET) e o Polipropileno (PP). As etapas representam de forma genérica o processo desde a extração da matéria-prima até a destinação final do produto e qual o percentual de filme plástico gerado.

Figura 2. Sistema de Produto do Ciclo de Vida do Filme Plástico



Fonte: (Os autores, 2026)

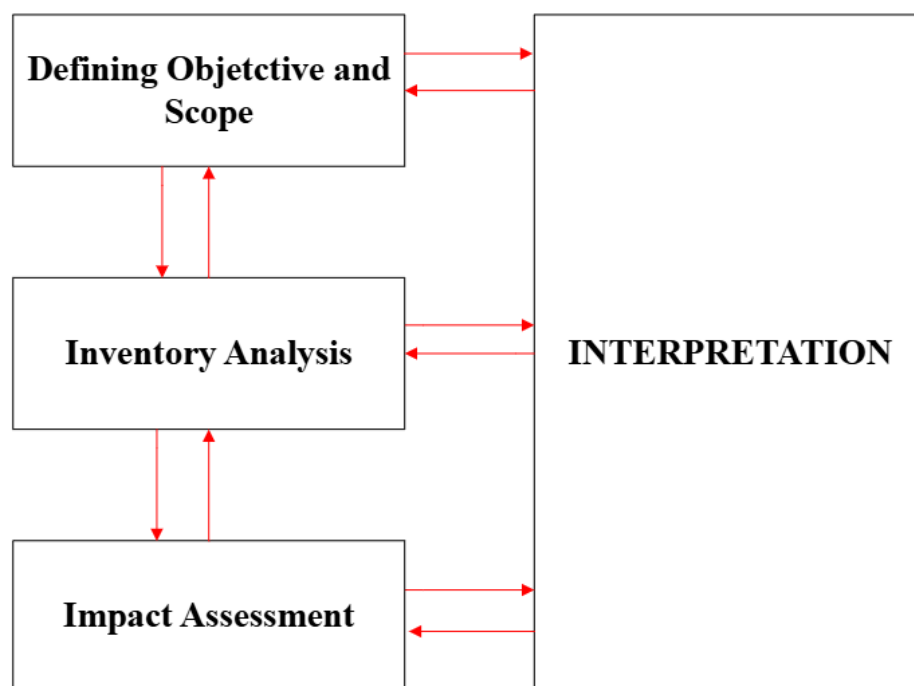
Para a definição dos percentuais de destino para os três fluxos finais (reciclagem, aterro e descarte a céu aberto), foi realizado um levantamento e análise dos dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023 (ABREMA, 2023) e do relatório de Monitoramento dos Índices de Reciclagem Mecânica de Plásticos Pós-Consumo no Brasil 2024 (Ano-Base 2023) (PICPLAST, 2024).

A análise dos percentuais de descarte final anual de embalagens plásticas mostra que 24,30% do resíduo plástico é destinado à reciclagem (Picplast, 2024). Já para o restante das embalagens plásticas, foi considerado que as mesmas podem ser classificadas como Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs), sendo gerenciadas como tal. Segundo a ABREMA (2023), 61,1% do total de RSUs gerados no Brasil em 2023 foram destinados para aterros sanitários.

2.3. Avaliação do Ciclo de Vida

No Brasil, as normas ISO sobre avaliação do ciclo de vida são representadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), sendo referenciadas como ABNT 14040 (2009a) e ABNT 14044 (2009b). A avaliação do ciclo de vida (ACV) abrange todos os processos que compõem o ciclo de vida de um produto ou serviço ou pode focar em apenas uma parte desses processos. Para conduzir um estudo de ACV, são necessárias as seguintes etapas: definição do objetivo e escopo, análise do inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados. Essas etapas são fundamentais para garantir que a análise seja abrangente e eficaz [26].

Figura 3. Estágios da Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: (ABNT, 2009).

2.4. Objetivo e Escopo

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 14040, os requisitos da ABNT NBR ISO 14044 devem ser aplicados na execução de uma ACV. De acordo com ambas as normas, o objetivo de uma ACV declara.

- A aplicação pretendida.
- As razões para execução do estudo.
- O público-alvo, ou seja, aquele a quem se pretende comunicar os resultados do estudo.
- Desta forma, o objetivo da ACV neste estudo segue Quadro 2.

Quadro 1. Função Produto

ITEM	PRODUTO
Aplicação	Compare os impactos ambientais das embalagens plásticas de PEAD, PEBD, PET e PP, considerando os impactos dos microplásticos.
Motivo	Identificar o impacto ambiental potencial de cada polímero, incorporando os impactos dos microplásticos.
Público-alvo	Comunidade acadêmica, indústrias de fabricação de plásticos, ecossistema marinho, órgãos governamentais e políticas públicas ambientais.

Fonte: (Os autores, 2025)

De posse disso, convém que o escopo seja suficientemente bem definido para assegurar que a abrangência, profundidade e detalhamento do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender ao objetivo declarado.

- Assim, as definições para o Escopo deste estudo de ACV seguem no Quadro 3.

Quadro 2. Definição de Escopo

Escopo	Função Produto	Filme plástico utilizado para embalar produtos (por exemplo, frutas e legumes)
	Função Unitária	Embalagem de 1 porção de frutas ou vegetais
	Fluxo de Referência	1 fração de filme plástico para embalagem com dimensões de 25 cm x 50 cm x 200 µm
	Sistema de Produto	Do berço ao túmulo (da extração de matéria-prima à disposição final, considerando cada um dos destinos observados nos cenários de análise de impacto ambiental)
	Metodologia de Impacto	ReCiPe 2016 Midpoint (H), ReCiPe 2016 Endpoint (H), MarILCA e UseTox
	Software de ACV	OpenLCA

Fonte: (Os autores, 2025).

2.5. Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Em conformidade com a norma ABNT 14040, “a análise do inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto” (ISO, 14040, 2006). A ABNT NBR ISO 14044:2009 afirma que, uma vez que a coleta de dados pode abranger vários locais de origem e referências publicadas, convém que sejam adotadas medidas para assegurar um entendimento uniforme e consistente dos sistemas de produto a serem modelados. Nesta seção são apresentados o inventário dos dados de balanço de massa e energia para os 4 filmes plásticos. **A TABELA 1** apresenta o ICV para PEAD. Nela, consideraram-se as massas de polímero utilizadas para a

fabricação do filme de PEAD e a eletricidade utilizada pelo maquinário para processar os grânulos de PEAD.

Tabela 1. Inventário de massa e energia da produção e do uso de PEAD. Densidade. = 0,96 g/cm³

Fase do CV	Processo	Material	Fluxo de massa (g)		Energia (kWh)
			Entrada	Saída	
Produção	Extrusão e corte	Grânulos	12,60	0,00	0,0187
		Resíduos de Extrusão	0,00	0,60	
		Filme Plástico	0,00	12,0	

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/avaliacao-do-ciclo-de-vida-de-filmes-plasticos-de-embalagem-considerando-impactos-ambientais-de-microplasticos?noblockage>

Fonte: O autor (2025), (a) Lacerda (2022)

As TABELA 2, TABELA 3, e TABELA 4 apresentam os ICVs para os filmes de PEBD, PP e PET, respectivamente, com a mesma lógica já descrita para o filme de PEAD.

Tabela 2. Inventário de massa e energia da produção e do uso de PEBD. Densidade. = 0.94 g/cm³

Fase do CV	Processo	Material	Fluxo de massa (g)		Energia (kWh)
			Entrada	Saída	

Produção	Extrusão e corte	Grânulos	12,33	0,00	0,0177
		Resíduos de Extrusão	0,00	0,58	
		Filme Plástico	0,00	11,75	

△ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/avaliacao-do-ciclo-de-vida-de-filmes-plasticos-de-embalagem-considerando-impactos-ambientais-de-microplasticos?noblockage>

Fonte: O autor (2025), (a) Lacerda (2022)

Tabela 3. Inventário de massa e energia da produção e do uso de PP.

Fase do CV	Processo	Material	Fluxo de massa (g)		Energia (kWh)
			Entrada	Saída	
Produção	Extrusão e corte	Grânulos	11,81	0,0	0,0169
		Resíduos de Extrusão	0,0	0,56	
		Filme Plástico	0,0	11,25	

△ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/avaliacao-do-ciclo-de-vida-de-filmes-plasticos-de-embalagem-considerando-impactos-ambientais-de-microplasticos?noblockage>

Fonte: O autor (2025) (a) Ecoinvent 3.9.1

Tabela 4. Inventário de massa e energia da produção e do uso de PET

Fase do CV	Processo	Material	Fluxo de massa (g)		Energia (kWh)
			Entrada	Saída	
Produção	Extrusão e corte	Grânulos	17,06	0,00	0,0245
		Resíduos de Extrusão	0,00	0,81	
		Filme Plástico	0,00	16,25	

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/avaliacao-do-ciclo-de-vida-de-filmes-plasticos-de-embalagem-considerando-impactos-ambientais-de-microplasticos?noblockage>

Fonte: O autor (2025) (a) Ecoinvent 3.9.1

2.6. Cálculo dos Impactos de Microplásticos para os Cenários de Análise

Os impactos de microplásticos foram calculados para a categoria de "Efeitos físicos na biota" no ecossistema marinho, usando a metodologia de [27]. Esse cálculo foi feito para os quatro polímeros estudados. As equações do Plastic Leakage Project (PLP) [28] foram usadas para determinar a taxa de liberação de microplásticos em rios e oceanos. Para isso, foi considerada uma taxa residual fixa de 25% e uma taxa de redistribuição fixa de 100%. Para o cálculo de Leak_macro (Vazamento do Plástico), foi utilizada a equação 1 - Vazamento de Macroplástico (Estágio Ciclo de Vida para o Oceano).

Equação 1. (Vazamento do Plástico no Oceano):

$$Leak_{macro} = \sum (MPW_{lifecyclestageX}) * LR_{countryY} * (RelR_{ocean}$$

Onde:

- Leak_macro = Vazamento de Macroplástico no oceano;
- MPW = Média de plástico por residência;
- LR = Taxa de liberação macroplásticas para um determinado país;
- RelR ocean = Taxa de liberação de MPs para o oceano;
- RelR frw = Taxa de liberação de MPs para água doce;
- RedR = Taxa de redistribuição da água doce para o oceano;

Onde o MPW é a média de Plástico por Residência em 25%; LR é a Taxa de Liberação de macroplásticos para um determinado país. Para o cálculo de MPW, usou-se o percentual calculado para o Brasil, resultando em 34,11% dos resíduos que acabam indo para o meio ambiente. RelR é a Taxa de Recuperação dos plásticos que vão para o oceano em 100%, RelRfrw é a Taxa de Recuperação dos plásticos que vão para ambientes de águas interiores em 25% para baixo valor residual, 15% valor residual médio e 10% alto valor residual, RedR refere-se ao percentual do resíduo reduzido, em dados comparativos de relatórios ambientais, baseado em dados sobre políticas de emissão de resíduos sólidos urbanos e ou práticas de redução dos resíduos, valor estipulado em 100%.

Para a realização do cálculo de ("Vazamento de microplásticos produzido no oceano") foram utilizadas as unidades de medida em (kg de plástico emitido / kg de plástico produzido). De acordo com o relatório (PLP) o valor residual de microplástico produzido no oceano é 0,001% [28]. Para a equação geral percentual % de microplástico, é dado pela seguinte forma: multiplica-se o valor residual de MPs produzido no oceano (0,001%) pela massa de resíduo plástico desprendido de cada polímero pela unidade funcional definida em 1kg, ou seja, para a realização da equação, foi necessário utilizar 1kg dos plásticos estudados + quantidade de microplástico liberado em gramas. A partir destas informações, segue a equação 2 padronizada para todos os polímeros da presente pesquisa, conforme citado por [28].

Equação 2. (Percentual de Microplástico):

$$\% MPs = (0,001\%) * \text{massa residual total do polímero em quilograma}$$

Onde:

- Microplásticos produzidos no oceano = 0,001%;
- Massa Residual = Massa residual total do polímero em quilograma (kg produzido / kg emitido);

Para melhor entendimento das variáveis das equações para os cálculos realizados de impacto ambiental de microplásticos, foi elaborada a tabela sobre os parâmetros de cálculo de plástico vazado no oceano, disponibilizados no Quadro 4 – Parâmetros de cálculo sobre a quantidade de plástico vazado no oceano.

Quadro 3. Parâmetros de cálculo e quantidade de plástico vazado para o oceano

Abreviação	Descrição	Unidade	Valor genérico, caso não haja informações disponíveis	Referência
MPW	Mass of plastic waste	kg	Data collected for a plastic leakage study	
LR	Total loss rate	% of waste	Calculated by country	
LR dirpat	Direct loss rate	% of waste	Values by country	World Bank (2018)
LR uncol	Uncollected waste loss rate	% of waste	Calculated by country	
Littering	Litter rate	% of waste	Waste rate matrix based on size and use	
Fly tipping	Illegal dumping rate	% of waste	Calculated by country	
Dumping	Dumping rate	% of waste	Calculated by country	
Landfill	Landfill rate	% of waste	Calculated by country	
Open dump	Landfill rates not specified by country	% of waste	Values by country	World Bank (2018)
RelR ocean	Ocean release rate	% Waste Lost	Release rate matrix based	World Bank (2018)

			on size and residual value	
RelR frw	Freshwater release rate	% Waste Lost	Release rate matrix based on size and residual value	World Bank (2018)
RedR ocean	Freshwater redistribution rate	% Waste Released	100%	Expert Estimate
Leak_macro	Macroplastic leakage	kg	Calculated	

Fonte: (QUANTIS e EA, 2020).

O **QUADRO 3** – apresenta os parâmetros utilizados para os cálculos de plásticos vazados no oceano, em casos primários, onde os valores não estejam disponíveis. Trata-se de valores genéricos, que devem ser usados para estimar o vazamento de produto de uma embalagem ou produto plástico. Ressalta-se que os valores devem ser atualizados, de acordo com o estado da arte da pesquisa e evolução sobre liberação de plásticos no oceano.

A taxa de liberação inicial de plástico é influenciada por vários fatores, como aspectos socioeconômicos (hábito de jogar lixo na rua, número de lixeiras), clima (chuva e vento) e até mesmo a distância de rios e costas. Por isso, a taxa de liberação de 25% é usada como um valor padrão para estimar o vazamento [29]. Outro fator, condições climáticas (chuva, vento na dispersão de resíduos em lixões), especificidades geográficas, sobre a distância em cursos d'água e costas e, por fim, as características dos resíduos, que podem sofrer influências substanciais nas taxas de liberação [30].

Parâmetros que influenciam as taxas de descarte de lixo e de liberação de microplásticos no oceano, valores são comumente usados sobre o percentual de liberação, de acordo com parâmetros regionalizados e mecanismos de liberação, até o momento 25% [31]. Para calcular a quantidade de microplásticos no fim de sua vida útil (reciclagem, aterro e descarte incorreto), utilizamos dados sobre a coleta de lixo da ABREMA (Panorama de Resíduos Sólidos do Brasil, 2024) e sobre a destinação final do PicPlast (Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico, 2023). Também usamos os fatores do MarILCA para avaliar os "efeitos físicos na biota", conforme a Tabela 6. A análise dos resultados é feita com base em três cenários para cada polímero: melhor caso, caso médio e pior caso. O melhor caso representa o limite inferior de 95% do impacto, o pior caso o limite superior de 95%, e o caso médio o valor intermediário para os efeitos físicos na biota [27].

Tabela 6. Fatores de Caracterização

Polímeros	FC (Média Geométrica Recomendada)	Limite Inferior de 95% (calculado)	Limite Superior de 95% (calculado)
Unidade	PDF*m ² *year / kg emitted		
Cenários	Caso médio	Melhor caso	Pior caso
PEAD	1,49E+00	2,98E+03	2,38E+06
PEBD	2,39E-01	9,33E+02	1,46E+06
PET	1,03E+00	4,65E+03	8,40E+06
PP	7,69E-02	4,89E+01	1,24E+04

Fonte: (CORELLA-PUERTAS *et al.*, 2023)

Estes valores apresentados foram dos fatores de caracterização do microfilme plástico em ambiente marinho para o PEAD, PEBD, PET e PP, no tamanho de 100 µm, considerado o tamanho default pelo MARILCA [27]. Além disto, vale aqui citar que os cenários refletem no padrão de fragmentação de macroplástico para microplástico, conforme [27]. O cenário de melhor caso possui um percentual de fragmentação de macroplástico para microplástico de 10% do total de massa liberada no ambiente. O cenário médio possui um percentual de 50%, enquanto o cenário de pior caso possui um percentual de fragmentação de 100% [27]. A partir destas definições, foram calculados os impactos ambientais potenciais da categoria de “efeitos físicos na biota” para cada caso, conforme a Equação 4.

$$CI_{\text{efeitos_fis_bio}_n} = (MM_n + MFV_n \cdot Fragn_n)FC_n$$

Onde, $CI_{\text{efeitos_fis_bio}_n}$ é o resultado do impacto ambiental potencial da categoria de “efeitos físicos na biota” para o Caso n, sendo 1 o Melhor caso, 2 o Caso médio, e 3 o Pior caso, MM_n a massa de microplásticos oriundos da manufatura liberados para o oceano (considere MM_n o resultado da equação 1 para a manufatura), MFV_n a massa de microplásticos oriundos do fim de vida liberados para o oceano (considere MFV_n o resultado da equação 1 para o fim de vida), $Fragn$ o percentual de fragmentação de macroplástico para microplástico para cada Caso, e FC_n o fator de caracterização aplicado para cada polímero e cada Caso, conforme TABELA 6.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e analisados os impactos ambientais potenciais da caracterização para os indicadores selecionados da metodologia de AICV ReCiPe 2016 Midpoint (H). Os resultados foram gerados para os 4 filmes plásticos de embalagem estudados (PEAD,

PEBD, PET e PP), considerando o cenário de destinação final contendo: reciclagem (24,30%), aterro sanitário (46,25 %) e descarte a céu aberto (29,45%), sendo apresentado na **TABELA 7**.

Tabela 7. Resultados das Categorias de Impacto para os 4 Filmes de Embalagem Plástica em Estudo Usando o Recipe 2016 Metodo Midpoint (H).

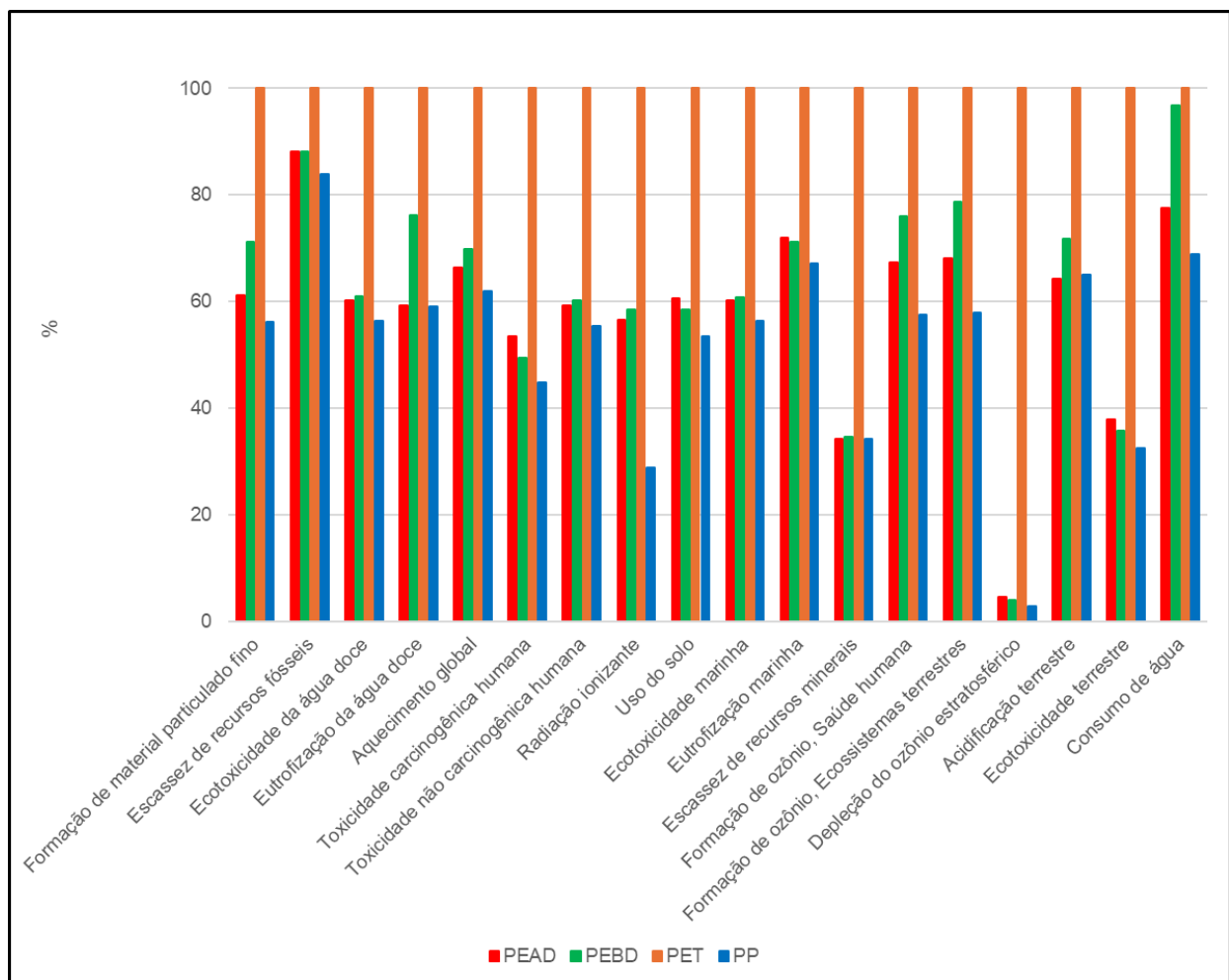
Categoria s de Impacto	Unidade	PEAD	PEBD	PET	PP
Formação de material particulad o fino	kg PM _{2.5} eq	3,94E-05	4,59E-05	6,44E-05	3,61E-05
Escassez de	kg oil eq	2,18E-02	2,18E-02	2,47E-02	2,08E-02

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/avaliacao-do-ciclo-de-vida-de-filmes-plasticos-de-embalagem-considerando-impactos-ambientais-de-microplasticos?noblockage>

Fonte: O autor (2025)

Para melhor visualização dos resultados obtidos, foi elaborada a FIGURA 4, trazendo os resultados obtidos pela normalização interna de valor máximo para as categorias de impacto sob análise.

Figura 4. Resultados das Categorias de Impacto para os 4 Filmes de Embalagem Plástica em Estudo Usando o Recipe 2016 Midpoint (H) + World (2010) Method.



Fonte: O autor (2025)

Através da FIGURA 4, pode-se observar que o PET apresentou os maiores impactos em todas as 18 categorias analisadas. Já o PEBD foi o segundo filme plástico mais impactante, considerando que ele teve impacto superior ao PEAD e PP em 13 das 18 categorias, sendo elas: Formação de material particulado fino, Escassez de recursos fósseis, Ecotoxicidade de água doce, Eutrofização de água doce, Aquecimento global, Toxicidade não carcinogênica humana, Radiação ionizante, Ecotoxicidade marinha, Escassez de recursos minerais, Formação de ozônio – saúde humana, Formação de ozônio – ecossistema terrestre, Acidificação terrestre e Consumo de água.

Vale ainda ressaltar que o PEBD, em 7 das 13 categorias, apesar de apresentar impacto ambiental superior ao PEAD, o aumento percentual foi inferior a 5%, mostrando um comportamento similar de impacto ambiental potencial com este filme plástico. Além disso,

para as 5 categorias em que o PEAD apresentou impacto ambiental potencial superior ao PEBD, o aumento percentual foi inferior a 5%, também mostrando similaridade de resultado entre eles.

Já o PP demonstrou ser o filme de embalagem com os menores impactos ambientais em comparação com os demais filmes plásticos, isto porque os resultados de impacto dele foram inferiores aos demais em todas as 18 categorias de impacto analisadas. Como complemento, cabe dizer que o PET teve um resultado de impacto ambiental de 100% para a categoria de impacto de Depleção do ozônio estratosférico, enquanto os demais polímeros apresentaram valores inferiores a 5% nesta categoria.

Como última análise, vale citar que o filme plástico de PET apresentou os maiores impactos ambientais potenciais em todas as categorias de impacto analisadas neste estudo. Contudo, é importante destacar que todos os filmes plásticos apresentaram valores percentuais elevados em três categorias de impacto ambiental, sendo elas: Escassez de recursos fósseis, Aquecimento global, Eutrofização marinha, Acidificação terrestre e Consumo de água. Neste caso, definiu-se como impacto ambiental potencial elevado aquele que fosse superior a 60% do valor do impacto em uma determinada categoria.

3.1. Resultados do Microplástico de Efeitos Físicos na Biota

Os cálculos de microplásticos na categoria de impacto em “efeitos físicos na biota” seguiram a metodologia do “Projeto Vazamento de Plástico no oceano” (PLP), que possibilita estimar a quantidade de microplásticos liberados no ambiente a partir de quantidades definidas de macroplásticos utilizados ao longo do ciclo de vida de

um produto. A realização desta estimativa foi feita a partir da quantidade de macroplásticos liberados no meio ambiente no fim de vida dos filmes plásticos e da quantidade de plásticos consumidos no processo produtivo dos filmes plásticos em estudo. Além disso, foi necessária a utilização dos dados de variáveis conforme TABELA 8.

Tabela 8. Variáveis para o Cálculo de Desprendimento de Microplásticos.

Variáveis / Cenários (PET, PEAD, PEBD e PP)	Quantidade / Especificação de valor	Referência
Vazamento de microplástico produzido no oceano	0,001%	Quantis e EA (2020)
Taxa de perda	0,01%	
Taxa de liberação final para o oceano	12%	
Fragmentação do filme plástico, para melhor caso	10%	Corella – Puertas (2023)
Fragmentação do filme plástico, para caso médio	50%	
Fragmentação do filme plástico, para pior caso	100%	

Fonte: O autor (2025)

A partir dos cálculos realizados com os valores já mencionados, utilizando as equações 1 e 3, foi possível obter a quantidade de microplásticos liberados para cada filme plástico e para cada caso, sendo que os resultados são apresentados na TABELA 9.

Tabela 9. Resultados da Estimativa de Lançamento de Microplástico no Oceano para os 4 Filmes de Embalagem.

Filme plástico	Unidade	Fabricação	Fim da vida útil com fragmentação		
			10%	50%	100%
HDPE	kg emitido	1,51E-07	1,02E-04	5,12E-04	1,02E-03
LDPE	kg emitido	1,48E-07	1,00E-04	5,01E-04	1,00E-03
PET	kg emitido	2,12E-07	1,39E-04	6,93E-04	1,39E-03
PP	kg emitido	1,42E-07	9,59E-05	4,80E-04	9,59E-04

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/avaliacao-do-ciclo-de-vida-de-filmes-plasticos-de-embalagem-considerando-impactos-ambientais-de-microplasticos?noblockage>

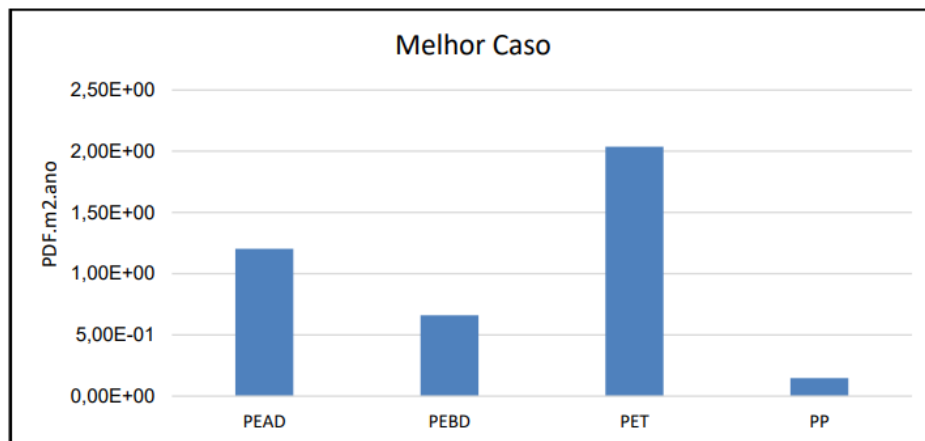
Fonte: O autor (2025)

Por fim, com a aplicação da Equação 4, utilizando-se dos fatores de caracterização da TABELA 6, foi possível obter os resultados da categoria de efeitos físicos na biota, para o Melhor caso, Caso médio e pior caso. Os resultados obtidos são apresentados nas FIGURA 5, FIGURA 6, e FIGURA 7. Através da análise das 3 Figuras, é possível perceber que o comportamento de impacto ambiental potencial em efeitos físicos na biota mantém seu padrão de comportamento dentre os diferentes filmes plásticos, sendo o PET o filme com o maior impacto e o PP o de menor impacto.

O PEAD é o segundo mais impactante seguido do PEBD, porém percebe-se que a diferença de impacto ambiental potencial reduz à medida que se caminha para o Pior caso. Quando se analisam estes

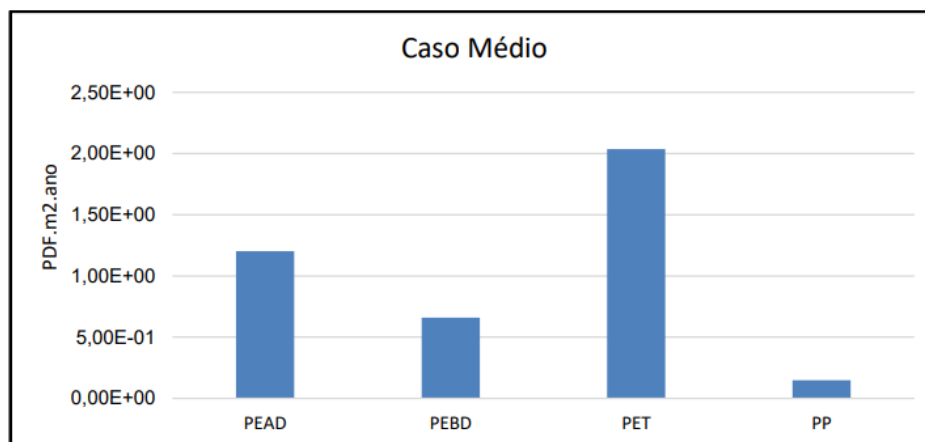
resultados em relação aos resultados obtidos com a utilização do método ReCiPe 2016 Midpoint H, é possível verificar que o padrão de comportamento fica semelhante, mostrando uma certa convergência de resultados.

Figura 5. Resultados da Categoria de Impacto de Efeitos Físicos na Biota para o Melhor Cenário.



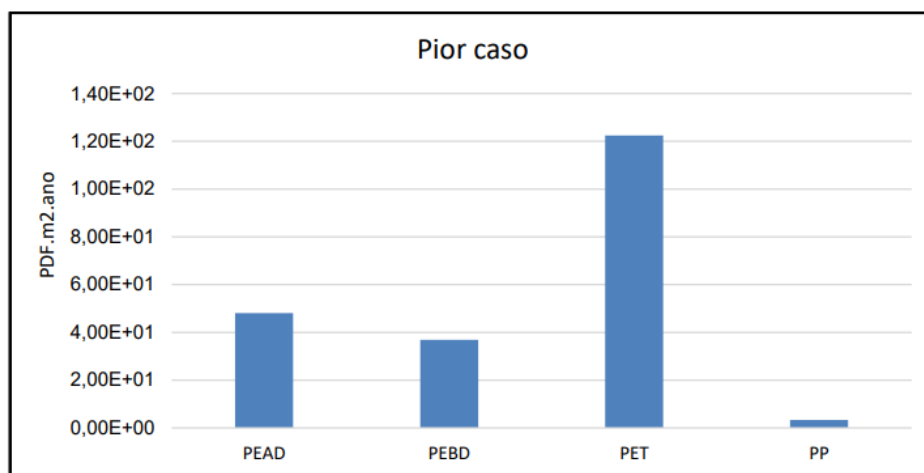
Fonte: O autor (2025)

Figura 6. Resultados da Categoria de Impacto de Efeitos Físicos na Biota para o Caso Médio.



Fonte: O autor (2025)

Figura 7. Resultados da Categoria de Impacto de Efeitos Físicos na Biota para o Pior Cenário.



Fonte: O autor (2025)

De modo a se avaliar de uma forma mais completa o impacto ambiental potencial das embalagens de filmes plásticos, foi realizado uma última análise em que se realizou a estimativa do impacto ambiental potencial de cada tipo de plástico de embalagem com o método ReCiPe 2016 Endpoint H e depois uniu-se estes resultados para a Área de proteção de Qualidade do Ecossistema com os resultados da categoria de efeitos físicos na biota, de modo a se enxergar a contribuição desta categoria nas demais constantes na Área de proteção. Este detalhamento segue a seção 4.3.

3.2. Resultados do Recipe Endpoint e Categoria de Efeitos Físicos para os Filmes Plásticos

Nesta seção, são apresentados os resultados da categoria de “efeitos físicos na biota” em conjunto com os resultados da utilização do método ReCiPe 2016 endpoint (H) v. 3.7.9. Estes resultados foram gerados no intuito de se analisar a importância da categoria de efeitos físicos na biota para o impacto ambiental potencial no Endpoint de Qualidade do Ecossistema, e consequentemente, o impacto ambiental potencial total dos filmes plásticos. Assim, apresenta-se a TABELA 10 com os resultados das categorias de

impacto do método ReCiPe 2016 Endpoint H e da estimativa de impacto da categoria de efeitos físicos na biota para os 3 cenários de análise (Melhor caso, caso médio e pior caso). Vale aqui dizer que para a apresentação dos resultados da TABELA 10, foi necessária a conversão da unidade de $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ano} / \text{kg}$ emitido para espécies.ano, conforme apresentado por [28]. Levando em consideração os fatores de conversão de densidade das espécies para ecossistema marinho definido ($3,46\text{E-}12$ espécies/ m^3) e a profundidade da mistura da água para a água do mar continental definida em 100 m.

Tabela 10. Resultados do Impacto Ambiental Potencial de Filmes Plásticos Utilizando o Método Recipe Endpoint e a Categoria de Efeitos Físicos na Biota

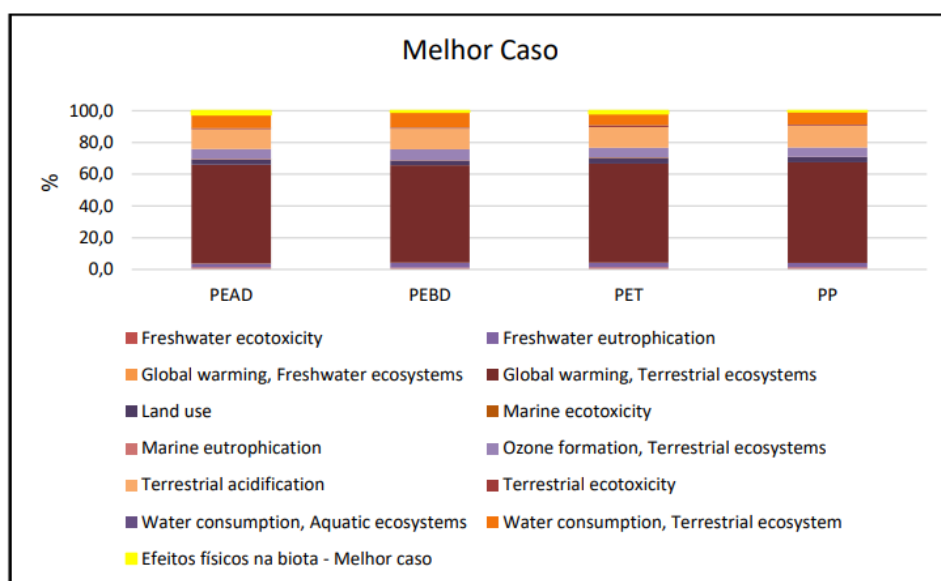
Categoria s de Impacto	Unidade	PEAD	PEBD	PET	PP
Ecotoxicidade em água doce	species.ye ar	2,00E-12	2,02E-12	3,32E-12	1,87E-
Eutrofização em água doce	species.ye ar	4,03E-12	5,18E-12	6,79E-12	4,02E
Acidificação	species.ye ar	3,68E-12	3,83E-12	4,04E-12	3,68E

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/avaliacao-do-ciclo-de-vida-de-filmes-plasticos-de-embalagem-considerando-impactos-ambientais-de-microplasticos?noblockage>

Fonte: O autor (2025)

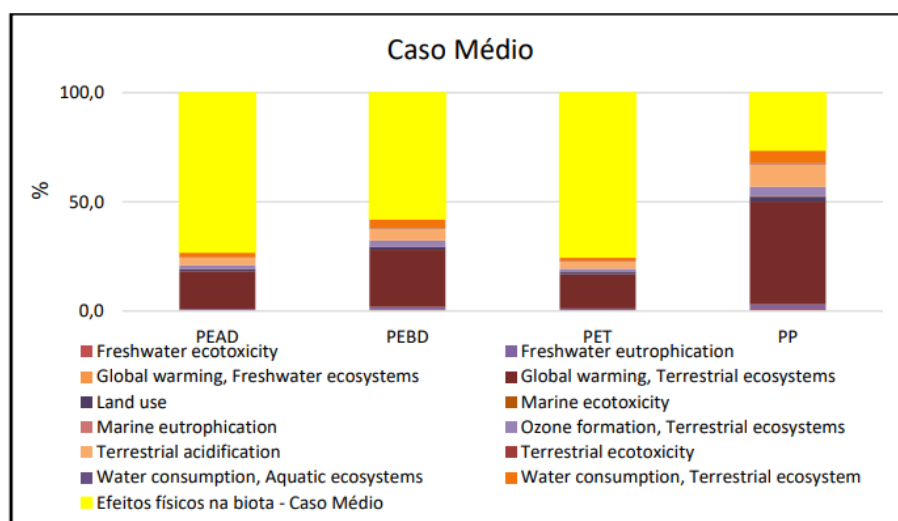
Para melhor visualização dos resultados obtidos por meio da caracterização, foram elaboradas as FIGURA 8, FIGURA 9, e FIGURA 10. Os resultados destas Figuras são apresentados em percentual, corresponde ao processo de normalização interna de soma de resultados.

Figura 8. Resultados do Tratamento com a Receita Endpoint H de 2016 e Efeitos Físicos na Biota – Melhor Cenário.



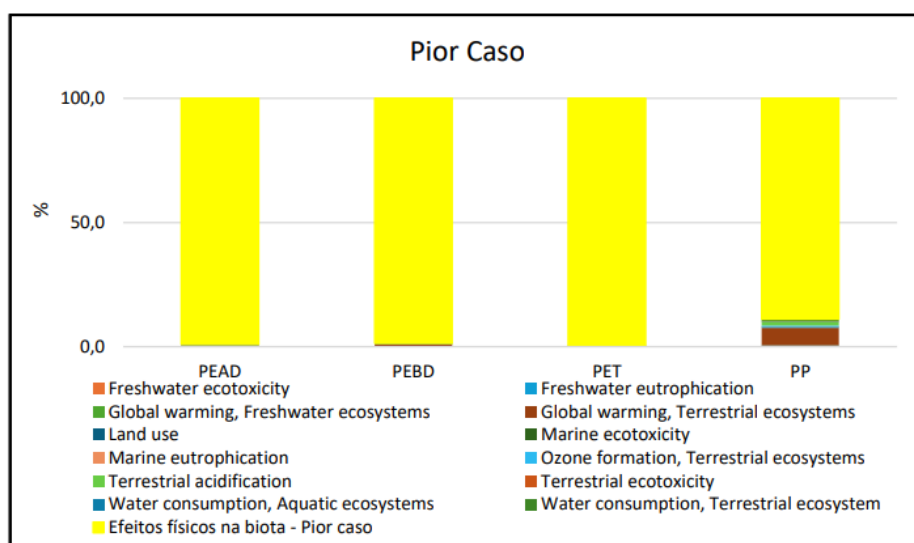
Fonte: O autor (2025)

Figura 9. Resultados do Método Receita 2016 (Categoria de Impacto Final H) E Efeitos Físicos na Biota – Cenário Médio.



Fonte: O autor (2025)

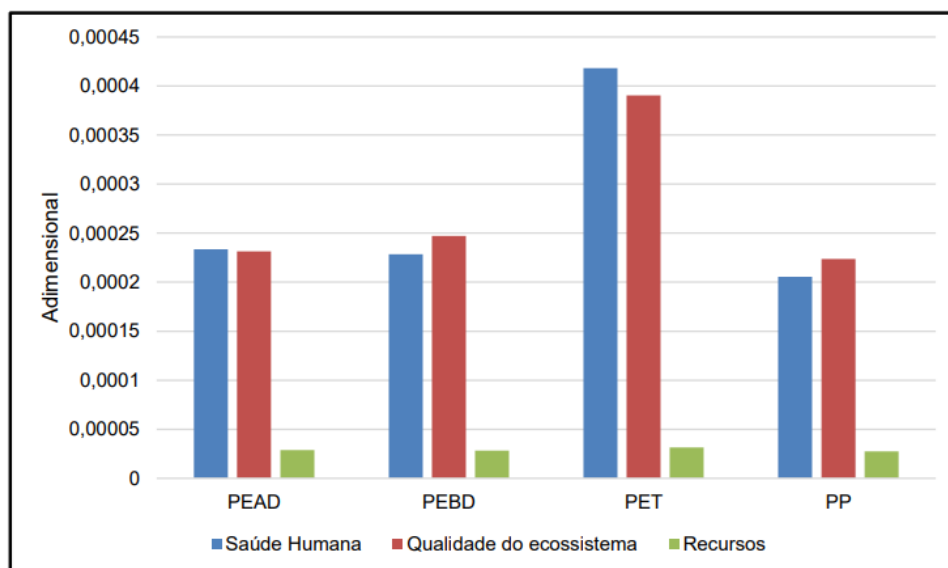
Figura 10. Resultados do Ponto Final H do Método Recipe (2016) E Efeitos Físicos na Biota – Cenário de Pior Caso.



Fonte: O autor (2025)

A FIGURA 8 revela que a categoria de impacto "Efeitos físicos na biota - Melhor caso" contribui para o impacto total da qualidade do ecossistema, porém, em um percentual ainda limitado, variando de 0,6% a 2,65% entre os quatro filmes plásticos. Por fim, a tem o principal objetivo de demonstrar o peso de cada categoria de dano em relação ao impacto ambiental total final de cada filme plástico estudado. Para a obtenção deste resultado, foi necessária a normalização externa dos resultados das categorias de danos através da utilização do conjunto de normalização World 2010, presente no método ReCiPe 2016 Endpoint (H). Vale aqui destacar ainda que os resultados da FIGURA 11 não incluem os impactos da categoria de efeitos físicos na biota, visto que não se tem disponibilidade de fator de normalização para esta categoria, impossibilitando a obtenção de um Eco-ponto final de resultados para cada filme plástico incluindo-a.

Figura 11. Resultados das Categorias de Danos do Recipe 2016 Endpoint H para os 4 Filmes Plásticos.



Fonte: O autor (2025)

Esta relação mostra que o valor da Qualidade do Ecossistema fica de 93% a 109% do valor da Saúde Humana. Apesar de não se possuir fator de normalização para a categoria de "Efeitos físicos na Biota", é possível perceber que, para o Caso médio, esta categoria aumenta em 26% a 75% o impacto ambiental potencial total da categoria de danos da qualidade do ecossistema, e para o Pior caso, o aumento apresenta-se entre 88 e 99% do impacto ambiental potencial para a qualidade do ecossistema.

Isto posto, possivelmente o impacto ambiental potencial total dos filmes plásticos crescerá de forma significativa, quando da inclusão dos efeitos dos microplásticos no meio ambiente. Vale ressaltar que os impactos ambientais dos microplásticos ainda estão sendo calculados de forma limitada, dado que existem outros efeitos conhecidos destas partículas, como a ecotoxicidade, a toxicidade humana e os efeitos de emaranhamento, que ainda não são quantificados pelos métodos de AICV existentes na atualidade.

Entretanto, os resultados obtidos ressaltam a importância de se considerar a categoria de impactos em efeitos físicos na biota em estudos de ACV, bem como outras categorias que tratem da

quantificação dos impactos de microplásticos, principalmente em situações que envolvam produtos vinculados a plásticos como materiais. Ou seja, aprofundar a pesquisa e desenvolver ferramentas de avaliação mais eficazes nesta área é essencial para que futuras ACVs possam oferecer uma abordagem mais abrangente das categorias de impacto, com o intuito de fornecer uma análise mais completa e acurada dos impactos ambientais provenientes dos filmes plásticos.

4. CONCLUSÃO

Este estudo quantificou e avaliou o impacto ambiental potencial de 4 filmes plásticos de embalagem através da ACV, considerando os impactos de microplásticos na categoria "efeitos físicos na biota". O estudo focou em quatro filmes de plásticos de embalagem: o Polietileno de Tereftalato (PET), Polietileno de alta densidade (PEAD), Polietileno de baixa densidade (PEBD) e o Polipropileno (PP). Através do método ReCiPe 2016 Midpoint (H), o presente estudo revelou que o PET, apresentou os maiores impactos ambientais potenciais em 15 categorias analisadas, dos 18 totais no estudo. O PEBD foi o mais impactante nas categorias: Escassez de recursos fósseis, Formação de ozônio em Ecossistemas terrestres e Consumo de água.

O PP, demonstrou ser o filme plástico com os menores impactos ambientais em comparação com os 4 filmes plásticos presentes no estudo. No entanto, vale ressaltar que todos os filmes plásticos apresentaram altos índices de impacto em cinco categorias: Eutrofização marinha, Escassez de recursos fósseis, Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres, Acidificação terrestre e Formação de ozônio, Saúde humana. O impacto dos microplásticos na biota aquática, sobre a ocorrência de liberação de microplásticos, os

resultados variaram de acordo com os cenários estipulados, no cenário melhor caso (fragmentação em 10%) o PEAD foi o filme plástico de maior impacto, no cenário em caso médio (fragmentação em 50%) o PET, teve um percentual de 25% mais impactante que o PEAD, tornando-se o filme plástico com maior impacto neste cenário e o mais impactante, principalmente por este cenário representar, dados mais realista de fragmentação dos filmes plásticos e em pior caso (fragmentação em 100%) O PET novamente apresentou maior impacto entre os demais filmes, superando o PEAD em 87,50%.

O PP, em todas as fases e análises, foi consistentemente o filme plástico de menor impacto em todos os cenários de fragmentação do filme plástico. Nota-se que não foi considerada uma classificação do filme plástico, do mais impactante para o menos impactante, contudo ressalta-se que os resultados foram influenciados pelos Fatores de Caracterização (FCs) de cada filme plástico estudado, uma vez que adotou-se a mesma quantidade de massa destinadas ao fim de vida para todos os filmes plásticos em: descarte a céu aberto, aterro sanitário e reciclagem.

Para melhor compreensão da inclusão dos impactos do microplástico na ACV, tratando-se da categoria de impacto efeitos físicos na biota, observa-se que há um aumento expressivo do impacto ambiental relacionado à qualidade do ecossistema. No cenário em melhor caso, a inclusão elevou o impacto ambiental potencial da categoria de dano entre 88% e 96%. Nos cenários em caso médio e pior caso, o impacto da categoria na qualidade do ecossistema superou 99% para todos os filmes plásticos. Esses resultados evidenciam a importância de se considerar os impactos de microplásticos na ACV, principalmente na categoria de impacto

em “efeitos físicos na biota” para uma avaliação mais precisa dos impactos ocasionados pelos microplásticos e seus efeitos na biota marinha. O estudo também evidencia a necessidade de avanço nos métodos de mensuração dos dados para termos uma compreensão mais realista possível dos impactos das micropartículas no cenário ambiental no que cerne os efeitos físicos na biota.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZOULAY, David et al. Plastic & health: the hidden costs of a plastic planet. Geneva: CIEL, 2019.
2. MOHARIR, Rucha V.; KUMAR, Sunil. Challenges associated with plastic waste disposal and allied microbial routes for its effective degradation: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 65-76, 2019.
3. RIUS-AYRA, Oriol; REN, Anhua; BISEROVA-TAHCHIEVA, Alisiya. Superhydrophobic Materials and Intermolecular Forces for Microplastics Removal. **ACS Materials Letters**, v. 7, n. 5, p. 1723-1731, 2025.
4. IGNATYEV, Igor A.; THIELEMANS, Wim; VANDER BEKE, Bob. Reciclagem de polímeros: uma revisão. **ChemSusChem**, v. 7, n. 6, p. 1579-1593, 2014.
5. STACHOWITSCH, Michael. Plastic. In: **The beachcomber's guide to marine debris**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 87-158
6. NETSCH, Niklas et al. Thermogravimetric study on thermal degradation kinetics and polymer interactions in mixed

thermoplastics. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 150, n. 1, p. 211-229, 2025.

7. RUSETSKAYA, Volha et al. Degradation ability of *Trichoderma* spp. in the presence of poly (butylene adipate-co-terephthalate) microparticles. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 193, p. 105829, 2024.
8. SAPEA: the Science Advice for Policy by European Academies consortium, 2019. A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01802-z>.
9. SURACI, Simone Vincenzo; FABIANI, Davide. Radiation-Induced Degradation in Polymeric Materials: Alterations in Physical–Chemical Properties and Their Effects on Electrical Performance of Insulation Systems. *High Voltage*, 2025.
10. ALMEIDA, Maria Aparecida Alves Leite dos Santos. Análise semiquantitativa de microplásticos na água de torneira na cidade de Brasília-Distrito Federal.
11. PEREIRA, Natália Lage de Carvalho. Efeitos interativos de microplásticos e ciprofloxacina nos decompositores microbianos aquáticos. Tese de Doutorado
12. SERAFIM, Angela; LOPES, Belisandra; FONSECA, Tainá. 7. Microplásticos no ambiente: uma nova ameaça à saúde humana?. *Micro e Nanoplásticos: um Macroproblema*, p. 115. 2022.

13. BORA, Sudipta Sankar et al. Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. **Frontiers in Cellular and Infection Microbiology**, v. 14, p. 1492759, 2024.
14. MERCÊS, Marcela Talita Rodrigues das et al. Microplásticos: seus impactos à saúde humana. SEMOC–Semana de Mobilização Científica-Economia Circular: o novo paradigma para a sustentabilidade, 2021.
15. IRFAN, Hamza et al. Microplastics and nanoplastics: emerging threats to cardiovascular health—a comprehensive review. **Annals of Medicine and Surgery**, v. 87, n. 1, p. 209-216, 2025.
16. ZHU, Long et al. Tissue accumulation of microplastics and potential health risks in human. **Science of the Total Environment**, v. 915, p. 170004, 2024.
17. LACERDA, Leonardo de Moura et al. Avaliação dos impactos ambientais de um processo industrial utilizando como matéria-prima policarbonatos virgem e reciclado. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 24, p. 1103-1113, 2019.
18. CLAUDINO, Edison S.; TALAMINI, Edson. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio: uma revisão de literatura. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, p. 77-85, 2013.
19. COELHO, Sheila Cristina de Souza. Origem, Distribuição E Composição Do Lixo Proveniente De Correntes Oceânicas Em Duas Praias Isoladas De Arraial Do Cabo-Rj.

20. XAYACHAK, Tu et al. The missing link: A systematic review of microplastics and its neglected role in life-cycle assessment. **Science of the Total Environment**, v. 954, p. 176513, 2024.
21. MASURA, Julie; HO, Derek. Microplastic metrology: Current techniques, best practices, and recommendations for environmental analysis. In: **Plastics in the Sea**. Academic Press, 2025. p. 25-68.
22. LI, Changchao et al. The “microplastome”–a holistic perspective to capture the real-world ecology of microplastics. **Environmental Science & Technology**, v. 58, n. 9, p. 4060-4069, 2024.
23. MORAES, William dos Santos et al. Um método simples e rápido para avaliação da contaminação por microplástico em sal comercial para consumo humano. 2023.
24. PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL, Disponível em: https://www.abrema.org.br/wpcontent/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acessado em 15 fevereiro de 2025.
25. ÍNDICES DE RECICLAGEM MECÂNICA DE PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO NO BRASIL - Abiplast - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Disponível em <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/indices-de-reciclagem-mecanica-de-plasticos-pos-consumo-no-brasil/>. Acessado em 09/08/2024.
26. OLIVEIRA, Leandro Gasparello de. Avaliação do ciclo de vida: uma ferramenta ambiental sustentável utilizada na esfera

industrial.

27. CORELLA-PUERTAS, Elena et al. Development of simplified characterization factors for evaluating expanded polystyrene microplastic emissions and tire wear applied in the life cycle assessment of food packaging. *Journal of Industrial Ecology*, v. 6, pp. 1882-1894, 2022.
28. QUANTIS, E. A. Plastic Leak Project: Methodological guidelines [em linha]. 2020. RAJENDRAN, Sundarakannan et al. Replacement of Petroleum Based Products With Plant-Based Materials, Green and Sustainable Energy—A Review. **Engineering Reports**, v. 7, n. 4, p. e70108, 2025.
29. DE DEUS GARGUR-LEAL, Iasmim et al. Changes in the organic matter deposition in the Southeastern America mangrove limit occurrence area (Santo Antônio Lagoon, Brazil). **Bulletin of Marine Science**, v. 101, n. 2, p. 841-860, 2025.
30. BELIOKA, Maria-Paraskevi; ACHILIAS, Dimitrios S. The effect of weathering conditions in combination with natural phenomena/disasters on microplastics' transport from aquatic environments to agricultural soils. **Microplastics**, v. 3, n. 3, p. 518-538, 2024.
31. Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, et al (2015) Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* (80-) 347:768–771. doi: 10.1126/science.1260352
32. RAJENDRAN, Sundarakannan et al. Replacement of Petroleum Based Products With Plant-Based Materials, Green

and Sustainable Energy—A Review. *Engineering Reports*, v. 7, n. 4, p. e70108, 2025.

33. KAUR, Amandeep; BALA, Ritu; KANSAL, Sushil Kumar. Recent Advances in Photodegradation of Various Plastics. **Plastic Degradation and Conversion by Photocatalysis (Volume 1): A Sustainable Approach**, p. 185-221, 2024.
34. GHAFFARI, Masoud. Recycling of healthcare plastic waste in Finland: sustainable alternative solutions: a life cycle assessment. 2025.
35. DOGRA, Kanika et al. Insights into the biodegradation and bioremediation of microplastics: mechanisms and analytical methods. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 48, p. 101133, 2025.
36. BULANDA, Katarzyna; OLEKSY, Mariusz; OLIWA, Rafał. Polymer Composites Based on Glycol-Modified Poly (Ethylene Terephthalate) Applied to Additive Manufacturing Using Melted and Extruded Manufacturing Technology. *Polymers*, v. 14, n. 8, p. 1605, 2022.
37. LUCCHETTA, Giovanni; MASATO, Davide; SORGATO, Marco. Optimization of mold thermal control for minimum energy consumption in injection molding of polypropylene parts. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, p. 217-226, 2018.
38. BOULAY, Anne-Marie; VERONES, Francesca; VÁZQUEZ-ROWE, Ian. Marine plastics in LCA: current status and MarILCA's contributions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 26, n. 11, p. 2105-2108, 2021.

39. KIM, Taeho; PARK, Kyungtae; HONG, Jinkee. Understanding the hazards induced by microplastics in different environmental conditions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, p. 127630, 2022.
40. TU, Chen et al. Biofilms of microplastics. In: **Microplastics in terrestrial environments: Emerging contaminants and major challenges**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 299-317.
41. ROAGER, Line; SONNENSCHNEIN, Eva C. Bacterial candidates for colonization and degradation of marine plastic debris. *Environmental science & technology*, v. 53, n. 20, p. 11636-11643, 2019.
42. HOU, Lijun et al. Biodegradability of polyethylene mulching film by two *Pseudomonas* bacteria and their potential degradation mechanism. **Chemosphere**, v. 286, p. 131758, 2022.
43. DI, Mingxiao; WANG, Jun. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China. **Science of the Total Environment**, v. 616, p. 1620-1627, 2018.
44. HAJJAR, Carla; BULLE, Cécile; BOULAY, Anne-Marie. Life cycle impact assessment framework for assessing physical effects on biota of marine microplastics emissions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 29, n. 1, p. 25-45, 2024.
45. VIGIL, Miguel et al. Sustainability analysis of active packaging for the fresh cut vegetable industry by means of attributional & consequential life cycle assessment. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 7207, 2020.

46. LUO, Xi et al. A review of analytical methods and models used in atmospheric microplastic research. **Science of the Total Environment**, v. 828, p. 154487, 2022.
47. SATHYAMOCHAN, Gobishankar et al. Sources and circulation of microplastics in the aerosphere–atmospheric transport of microplastics. **Microplastics in the Ecosphere: Air, Water, Soil, and Food**, p. 125-146, 2023.
48. KANNANKAI, Madhuraj Palat; DEVIPRIYA, Suja Purushothaman. Atmospheric microplastic deposition in a coastal city of India: The influence of a landfill source on monsoon winds. **Science of the Total Environment**, v. 908, p. 168235, 2024.
49. COOREMAN-ALGOED, Margot et al. Environmental life cycle assessment of nutraceuticals: a case study on methylcobalamin in different packaging types. *Science of the Total Environment*, v. 893, p. 164780, 2023.
50. BAI, Cui-Lan et al. Microplastics: A review of analytical methods, occurrence and characteristics in food, and potential toxicities to biota. **Science of the Total Environment**, v. 806, p. 150263, 2022
51. ANDRADY, Anthony L. Microplastics in the marine environment. *Marine pollution bulletin*, v. 62, n. 8, p. 1596-1605, 2011.
52. EPA, 2011b. Sources, fates and effects of microplastics in the marine environment: a review. U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., EPA 820-R-11-001.

53. GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.

¹ Docente do Curso Superior de Engenharia de Produção do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia *Campus* Itacoatiara, AM. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#) ou [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente do Curso Superior de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Paraná *Campus* Curitiba, PR. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)