



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Facultade de Ciencias

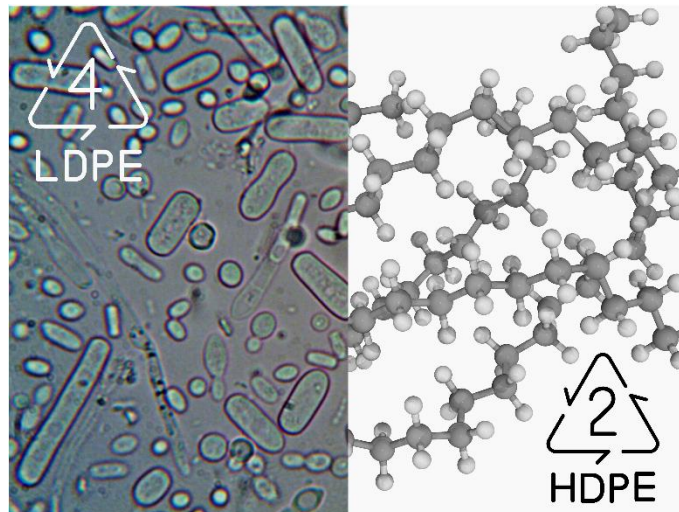
Grao en Bioloxía

Memoria do Traballo de Fin de Grao

Revisión bibliográfica: Biorremediación para la degradación de plásticos de polietileno por microorganismos

Revisión bibliográfica: Biorremediación para a degradación de plásticos de polietileno por microorganismos

Literature review: Bioremediation for the degradation of polyethylene plastics by microorganisms



Sara Otero Méndez-Benegassi

Curso: 2023 – 2024. Convocatoria: xuño.

Director Académico: José Pablo Fidalgo Paredes

ÍNDICE

RESUMEN/RESUMO/ABSTRACT Y PALABRAS CLAVE/KEY WORDS

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	3
4. BIODEGRADACIÓN DEL POLIETILENO (PE)	4
4.1. Mecanismos y microorganismos implicados	4
4.2. Enzimas involucradas	7
5. DESAFÍOS EN LA BIODEGRADACIÓN DEL PE.....	10
6. INGENIERÍA DE LA BIORREMEDIACIÓN DEL PE	11
6.1. Bioestimulación	13
6.2. Bioaumentación.....	15
7. APLICACIONES POTENCIALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS.....	18
8. CONCLUSIONES/CONCLUSIÓN/CONCLUSIONS	20
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

Figura de la portada: Elaboración propia utilizando el software Canva. Adaptado de *Microorganismos bajo un microscopio*. [Fotografía], por turek, n.d., Canva (<https://www.canva.com/photos/MAExwGYSw-w/>) y de "Polietileno [Fotografía], por Science Photo Library, n.d., Canva (<https://www.canva.com/photos/MADmTDozc2s/>).

RESUMEN

La contaminación por residuos plásticos, particularmente la del polietileno (PE), ha sido objeto de numerosos estudios en los últimos años. El PE es altamente resistente a la degradación ambiental debido a sus propiedades fisicoquímicas. Este trabajo de fin de grado hace una revisión sobre los avances en la biodegradación del PE mediante microorganismos, enfocándose en estrategias de biorremediación como la bioestimulación y la bioaumentación. Estos métodos han mostrado aumentar significativamente la biodegradación del PE en condiciones controladas. Con todo, la aplicación práctica de estas técnicas requiere una evaluación exhaustiva de su impacto ecotoxicológico y la optimización de las condiciones ambientales para garantizar su efectividad. La combinación de diversas técnicas de biorremediación y la investigación continua en este campo son esenciales para desarrollar soluciones sostenibles que mitiguen la contaminación plástica por PE.

PALABRAS CLAVE: polietileno, contaminación plástica, biodegradación, biorremediación, microorganismos.

RESUMO

A contaminación por residuos plásticos, particularmente a do polietileno (PE), foi obxecto de numerosos estudos nos últimos anos. O PE é altamente resistente á degradación ambiental debido ás súas propiedades fisicoquímicas. Este traballo de fin de grao fai unha revisión sobre os avances na biodegradación do PE mediante microorganismos, enfocándose en estratexias de biorremediación como a bioestimulación e a bioaumentación. Estes métodos mostraron aumentar significativamente a biodegradación do PE en condicións controladas. Con todo, a aplicación práctica destas técnicas require unha avaliación exhaustiva do seu impacto ecotoxicolóxico e a optimización das condicións ambientais para garantir a súa efectividade. A combinación de diversas técnicas de biorremediación e a investigación continua neste campo son esenciais para desenvolver solucións sostibles que mitiguen a contaminación plástica por PE.

PALABRAS CLAVE: polietileno, contaminación plástica, biodegradación, biorremediación, microorganismos.

ABSTRACT

Plastic waste pollution, particularly polyethylene (PE), has been the subject of numerous studies in recent years. PE is highly resistant to environmental degradation due to its physicochemical properties. This degree final project reviews advances in the biodegradation of PE by microorganisms, focusing on bioremediation strategies such as biostimulation and bioaugmentation. These methods have shown to significantly increase the biodegradation of PE under controlled conditions. Nevertheless, the practical application of these techniques requires a thorough evaluation of their ecotoxicological impact and the optimization of environmental conditions to guarantee their effectiveness. The combination of various bioremediation techniques and ongoing research in this field are essential to develop sustainable solutions that mitigate PE plastic pollution.

KEY WORDS: polyethylene, plastic pollution, biodegradation, bioremediation, microorganisms.

1. INTRODUCCIÓN

En el último siglo, el plástico se ha convertido en uno de los materiales más imprescindibles para la humanidad, con una producción global en constante crecimiento que rozó los 400 millones de toneladas en 2020 (Zhang et al., 2022b). Algunos autores (Singh Jadaun et al., 2022) incluso afirman que, dentro de la escala geológica, el ser humano se ubica en la Era del Plástico.

El polietileno (PE) es el plástico más común, constituyendo aproximadamente el 36% del mercado total de plásticos (Jin et al., 2023; Temporiti et al., 2022). El PE es un termoplástico obtenido a partir de un proceso de polimerización de etileno a alta presión (Zhang

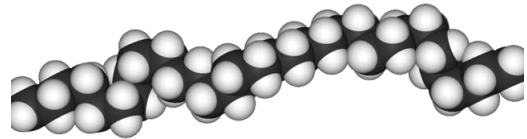


Fig. 1: Estructura 3D de la molécula de PE. Fuente: Dominio público, Wikimedia Commons.

et al., 2023b). Este alcano es un compuesto altamente recalcitrante, lo que significa que se descompone muy lentamente en el medio ambiente debido a características como su alto peso molecular, su cristalinidad y su hidrofobicidad, además de que sus monómeros como el etileno y el propileno provienen de hidrocarburos fósiles (Temporiti et al., 2022; Yao et al., 2022b). Este polímero de estructura lineal carbono-carbono (CC) se divide en varias categorías según sus propiedades y métodos de producción, como el polietileno de baja densidad (LDPE), el polietileno de alta densidad (HDPE) y otras variantes (Jin et al., 2023; Zhang et al., 2022b).

El PE, que destaca por su versatilidad y bajo costo, tiene numerosas aplicaciones industriales y domésticas; desde embalajes hasta artículos para el hogar, juguetes y envases de alimentos y productos farmacéuticos, el PE es ampliamente utilizado por sus cualidades deseables: ligereza, resistencia, durabilidad y flexibilidad (Singh Jadaun et al., 2022; Zhang et al., 2023b; Zhang et al., 2022b).

La producción mundial del PE fue de aproximadamente 104,4 millones de toneladas en 2020, con proyecciones que indican un crecimiento hasta los 121,4 millones de toneladas para 2026. Este aumento en la producción refleja la creciente demanda y el uso generalizado del PE en diversas industrias, incluyendo embalaje, construcción y transporte (Yao et al., 2022b). A pesar de los intentos por encontrar nuevos polímeros, el PE, especialmente el LDPE, mantiene su posición como uno de los principales tipos

de plástico en el mercado global, con un valor aproximado de 31 mil millones de euros (El-Sherif et al., 2022).

El PE representa una parte significativa (58%) de los desechos plásticos a nivel mundial, terminando en vertederos o liberado directamente al medio ambiente, mientras que solo el 18% se recicla (Zhang et al., 2022b). Debido a que el PE es altamente resistente a la degradación, sus desechos pueden permanecer en el medio ambiente durante décadas o incluso siglos (Zhang et al., 2023b). En 2018, se produjeron alrededor de 250 millones de toneladas de desechos plásticos en todo el mundo, y aproximadamente el 30% de ellos se eliminaron de manera inapropiada, contribuyendo a la contaminación de hábitats terrestres y acuáticos (El-Sherif et al., 2022). Los métodos tradicionales de gestión de residuos de PE, como el vertido en vertederos y la incineración, no son efectivos y pueden generar emisiones tóxicas y contribuir al calentamiento global (Jin et al., 2023).

Asimismo, los efectos tóxicos de los plásticos son preocupantes para los ecosistemas y la salud humana. Los desechos plásticos liberan lixiviados que afectan a las comunidades y actividad de los microorganismos del suelo (Yao et al., 2022b), y se descomponen en microplásticos; las partículas de PE contaminan la tierra y el agua, y afectan a la calidad del suelo y la salud de los organismos terrestres (El-Sherif et al., 2022; Jin et al., 2023). En entornos marinos, la presencia de partículas flotantes de PE puede causar daños graves en los animales y, al ingresar en la cadena alimentaria, aumentar los riesgos de bioacumulación y sus consecuentes efectos adversos en la salud humana (Ahmed et al., 2022; Jin et al., 2023; Temporiti et al., 2022).

Estos efectos reflejan la urgencia de abordar la contaminación plástica mediante enfoques más ecológicos, que no solo incluyan la reducción de su uso y el reciclaje, sino también el desarrollo de técnicas más sostenibles en la gestión de los residuos derivados, como la biodegradación.

Como mencionó Alyson E. Santoro (2016), "deberíamos saber a estas alturas que, si una reacción es termodinámicamente posible, los microorganismos encontrarán la manera" (p. 342).

Los desechos plásticos han originado un nuevo nicho ecológico, la plastisfera, que alberga una variada comunidad de microorganismos que interactúan entre sí y con el plástico (Rogers et al., 2020).

Los microorganismos pueden degradar la mayoría de los compuestos orgánicos e inorgánicos, lo que los convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente para evitar la acumulación de plásticos (Yao et al., 2022b). La biodegradación del PE por la acción de microorganismos y las enzimas implicadas (PEasas) es un tema de creciente interés, dado que su atenuación natural —su biodegradación en la naturaleza, mediada por microorganismo autóctonos— presenta tasas muy bajas. Sin embargo, la investigación sobre los mecanismos biológicos detrás de la biodegradación del PE es aún limitada (Zhang et al., 2023b; Zhang et al., 2022b).

En los últimos años, los estudios se han centrado en desarrollar técnicas novedosas para optimizar las condiciones degradativas de este plástico, explorando métodos de biorremediación como la bioestimulación y la bioaumentación. A pesar de los desafíos que presenta la naturaleza resistente del PE, el estudio de las estructuras que dificultan su degradación, junto con la optimización enzimática de las PEasas mediante diversas estrategias de biorremediación, ofrece perspectivas prometedoras para enfrentar la problemática de la contaminación plástica.

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es elaborar una revisión sobre la biodegradación del PE mediada por microorganismos con el fin de atenuar la contaminación plástica de manera más efectiva. Para ello, este trabajo se enfoca en estudios de optimización metabólica a través de la implementación de técnicas de biorremediación como la bioestimulación y la bioaumentación.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Para la elaboración de este trabajo de revisión bibliográfica, se realizaron múltiples búsquedas en páginas web de organizaciones de renombre tales como Web of Science y PubMed. Estas búsquedas se acotaron a los últimos cinco años para garantizar la actualización de los artículos seleccionados y evitar una saturación de información, aunque se han tenido en cuenta otros trabajos anteriores por su relevancia. Se empezó explorando con palabras clave como "microplastics biodegradation" y, posteriormente, se refinó la búsqueda empleando términos como "biostimulation polyethylene biodegradation" o "genetic engineering polyethylene biodegradation".

4. BIODEGRADACIÓN DEL POLIETILENO (PE)

4.1. Mecanismos y microorganismos implicados

La biodegradación está condicionada por diversos factores ambientales y las propiedades físicas y químicas del material plástico. Este proceso implica la despolimerización del plástico en cadenas más cortas, seguida de su asimilación celular y, finalmente, su mineralización (Temporiti et al., 2022). En la biodegradación del PE mediada por microorganismos, están involucradas una serie de etapas que integran mecanismos tanto abióticos como bióticos para descomponer el polímero de manera eficiente (Miri et al., 2022; Zhang et al., 2023b; Zhang et al., 2022b). Estas etapas se pueden sintetizar en:

- (i) *Adhesión*. Los microorganismos colonizan la superficie del PE, utilizando polisacáridos extracelulares o biosurfactantes para adherirse y formar biopelículas que dañan la superficie del plástico.
- (ii) *Biodeterioro*. Se inicia la degradación de la estructura del PE mediante la producción de enzimas que provocan grietas e intersticios. La exposición a factores abióticos como la radiación ultravioleta (UV) y el calor también contribuyen debilitando el material.
- (iii) *Biofragmentación*. Las enzimas extracelulares descomponen los polímeros complejos en oligómeros, dímeros y monómeros más sencillos, actuando principalmente en la superficie del plástico.
- (iv) *Asimilación*. Los oligómeros oxidados son transportados al citoplasma y metabolizados a través de vías enzimáticas como la β -oxidación y el ciclo del ácido tricarboxílico, para obtener energía que puede ser utilizada por los microorganismos.
- (v) *Mineralización*. Finalmente, los productos metabolizados son convertidos en H_2O , CO_2 y CH_4 . Este proceso se lleva a cabo a través de una variedad de rutas metabólicas bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas, completando así la descomposición del PE.

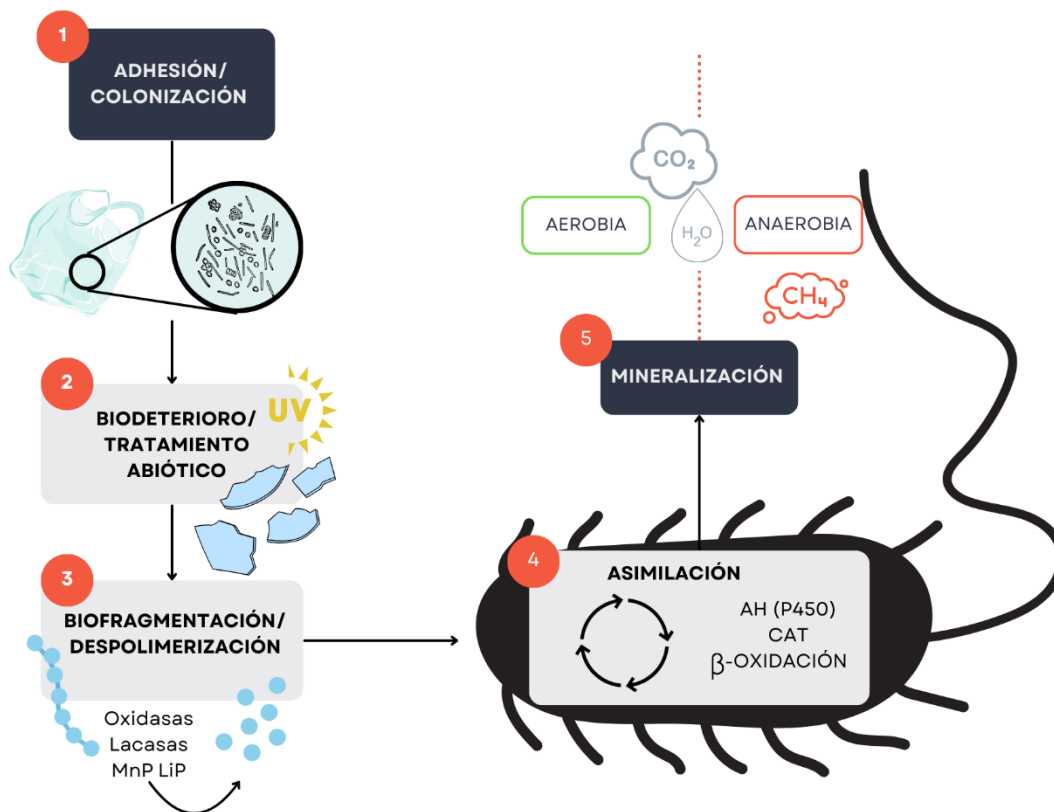


Fig. 2: Esquema de la ruta de la biodegradación microbiana del PE. MnP, manganeso peroxidasa; LiP, lignina peroxidasa; AH, alcano hidroxilasa; P450, citocromo P450; CAT, ciclo del ácido tricarbóxico. Fuente: Elaboración propia utilizando el software Canva.

Para llevar a cabo la evaluación de la biodegradación del PE, existen varios métodos, entre los que destaca la medición de su pérdida de peso (Ghatge et al., 2020). De manera complementaria, los estudios de microscopía electrónica de barrido y de fuerza atómica, también se emplean para confirmar la degradación del PE y observar los cambios morfológicos en las superficies de los plásticos inducidos por la actividad microbiana.

Para analizar los productos metabólicos de la biodegradación, como el biogás (una mezcla de metano y CO₂) producido por microorganismos anaerobios, se puede utilizar la cromatografía de gases. Además, el radiomarcaje es útil para estudiar la degradación de materiales en matrices poliméricas que contienen fuentes de carbono (Sharma y Jain, 2020).

Se ha identificado una amplia gama de géneros bacterianos y fúngicos que participan en la degradación del PE. Entre los géneros bacterianos, destacan *Pseudomonas*, *Ralstonia*, *Stenotrophomonas*, *Klebsiella* y *Rhodococcus*; entre los fúngicos, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Penicillium* y *Phanerochaete* (Cai et al., 2023;

Ghatge et al., 2020). Estos microorganismos son capaces de deteriorar la superficie del polímero, formar biopelículas en ella y producir enzimas extracelulares que facilitan la degradación.

A pesar de que los hongos son más competentes para adherirse a la superficie hidrofóbica del plástico y para sobrevivir en condiciones de recursos limitantes, la eficacia comparativa entre bacterias y hongos en la degradación del PE muestra que la β -oxidación bacteriana es considerablemente más efectiva que la fúngica. Además, aunque los hongos pueden hidrolizar las capas superficiales del PE, su habilidad para penetrar en la estructura principal es limitada, a diferencia de las bacterias, que pueden degradar las capas más profundas del material (Ghatge et al., 2020; Montazer et al., 2020).

Aparte de estos dos grupos, también encontramos especies de algas y cianobacterias, como *Scenedesmus dimorphus* y *Oscillatoria subbrevis*, que han demostrado ser capaces de degradar el PE (Singh Jadaun et al., 2022), lo que resalta la diversidad de los microorganismos involucrados en este proceso y su adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales.

La capacidad de una sola especie para transformar contaminantes disminuye notablemente cuando se trata de compuestos complejos, debido a que estos generan condiciones de estrés y que dificultan su metabolismo. En contraposición, los consorcios microbiológicos, constituidos por múltiples especies, demuestran una elevada resistencia y funcionalidad al cooperar entre sí para aprovechar todo tipo de sustratos (Li et al., 2021). Los consorcios de microorganismos son más eficientes que las cepas individuales en la degradación de plásticos, gracias a su capacidad para formar biopelículas que amortiguan las perturbaciones ambientales. Además, debido al cometabolismo resultante de estas comunidades, presentan una mayor capacidad enzimática y mejoran la biodegradación de manera indirecta (Ali et al., 2021; Miri et al., 2022; Zhang et al., 2023b). Esmaeili et al. (2013) evaluaron la biodegradación de películas de LDPE en el suelo, tanto en presencia como en ausencia de un consorcio de microorganismos (*Aspergillus niger* y *Lysinibacillus xylanilyticus*). Los resultados con un pretratamiento de irradiación UV mostraron que la degradación sin el consorcio fue lenta, alcanzando solo un 8,6%, mientras que, al añadir el consorcio, la biodegradación aumentó significativamente hasta un 29,5%.

El estudio de estas comunidades naturales en la plastisfera, asegurando una interacción sinérgica entre sus miembros, puede proporcionar perspectivas innovadoras para el desarrollo de consorcios microbiológicos que degraden el PE (Zhang et al., 2023b).

4.2. Enzimas involucradas

La biodegradación de plásticos con enlaces CC, como el PE, es limitada debido a la falta de grupos funcionales hidrolizables, lo que representa un gran desafío sin pretratamientos fisicoquímicos. Los factores abióticos, como la irradiación UV y térmica y la adición de agentes oxidantes, pueden inducir la formación de dichos grupos funcionales en el esqueleto carbonado del PE, facilitando la acción de las enzimas microbiológicas (Andler et al., 2022; Ghatge et al., 2020; Zhang et al., 2023b).

En la Tabla I, se recogen las principales enzimas involucradas en la biodegradación del PE, constituyendo un factor crítico en el desarrollo de tecnologías para optimizar este proceso.

Los microorganismos secretan oxidasas extracelulares que facilitan la degradación del PE. Entre estas enzimas, se encuentran las alcano hidroxilasas (AH), que promueven la hidroxilación terminal de los alcanos, como el PE. Este proceso produce aldehídos y ácidos, los cuales luego ingresan en la β -oxidación intracelular (Yao et al., 2022a; Zhang et al., 2023b). En estudios con *Pseudomonas aeruginosa* E7, se ha observado una actividad significativa en la degradación del PE mediante estas enzimas, especialmente en el LDPE (Zhang et al., 2023b). Dentro del grupo de las enzimas AH, el citocromo P450 también se describe como una molécula clave en la biodegradación del PE, como se ha observado en bacterias tales como *Rhodococcus spp.* y *Bacillus spp.* (Yao et al., 2022b).

Además de las AH, se ha encontrado que las enzimas degradadoras de lignina (lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa y lacasa) son secretadas extracelularmente por microorganismos relacionados durante la degradación de plásticos de PE (Yao et al., 2022a).

La lacasa es una enzima multicobre oxidasa que cataliza la oxidación de una amplia gama de compuestos fenólicos y aminas, con la reducción concomitante de oxígeno molecular a agua. Este proceso involucra un mecanismo de transferencia de

electrones facilitado por los átomos de cobre en el sitio activo de la enzima. La lacasa se distingue de otras peroxidases y oxidasas fenólicas al utilizar oxígeno como aceptor de electrones, en lugar de peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Su versatilidad enzimática la hace especialmente útil en aplicaciones biotecnológicas, como la biorremediación, incluyendo la biodegradación del PE (Singh y Marchant, 2015; Yao et al., 2022a).

Un ejemplo de biodegradación mediada por lacasas lo encontramos en el estudio de Yao et al. (2022a), en donde se emplea un sistema lacasa-mediador. Los mediadores son compuestos pequeños que, al ser oxidados por la lacasa, pueden oxidar otros sustratos. Son necesarios porque la lacasa, debido a su potencial redox limitado y a la estructura hidrofóbica del PE que carece de grupos funcionales accesibles, no puede oxidarlo directamente. Los mediadores oxidados se convierten en radicales intermediarios altamente reactivos con un potencial redox más alto, permitiendo la oxidación del PE al introducir grupos funcionales oxigenados como carbonilos y alcoholes en su estructura. Esto hace que el polímero sea más susceptible a la fragmentación en moléculas más pequeñas, promoviendo su despolimerización parcial y eventual biodegradación.

Por otra parte, hongos como *Aspergillus flavus* y *Pleurotus ostreatus* también han mostrado una degradación significativa del PE utilizando estas enzimas (Cai et al., 2023; Ghatge et al., 2020; Yao et al., 2022b; Zhang et al., 2022b). Además, según la revisión de Zhang et al. (2022b), la lacasa de *Trametes versicolor*, en presencia de 1-hidroxibenzotriazol como mediador, fomentó una notable reducción del peso molecular de las membranas del PE.

La cepa C208 de *Rhodococcus ruber* ha sido destacada en varios trabajos por su idoneidad a la hora de degradar películas de PE pretratadas con irradiación UV, que provoca la formación de grupos carbonilo (Ghatge et al., 2020). Esta cepa utiliza la enzima lacasa, que exhibe una alta estabilidad térmica, manteniendo su actividad óptima a 70 °C y propiciando una degradación del 45% del PE a esta elevada temperatura, tal como se menciona en las revisiones de Miri et al. (2022) y Zhang et al. (2022b).

En ensayos de biodegradación del PE, la genómica y transcriptómica de *Alternaria alternata* FB1 revelaron una regulación significativa al alza de genes que codifican para lacasas, peroxidases e hidroxilasas (Jin et al., 2023; Zhang et al., 2023b).

Tabla I. Enzimas involucradas en la biodegradación del PE y los respectivos microorganismos que las producen. Tabla elaborada a partir de los artículos de Andler et al. (2022), Cai et al. (2023), Ghatge et al. (2020), Jin et al. (2023), Miri et al. (2022), Yao et al. (2022a), Yao et al. (2022b), Zhang et al. (2022a), Zhang et al. (2022b) y Zhang et al. (2023b). Fuente: Elaboración propia.

Enzimas	Hongos	Bacterias
Lacasa	<i>Aspergillus flavus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Trametes versicolor</i> , <i>Alternaria alternata</i>	<i>Rhodococcus ruber</i> , <i>Psychrobacter sp.</i>
Manganeso peroxidasa	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	<i>Bacillus cereus</i>
Lignina peroxidasa	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	<i>Streptomyces sp.</i>
Glutación peroxidasa	<i>Alternaria alternata</i>	-
Alcano hidroxilasa	-	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> E7
Citocromo P450	-	<i>Rhodococcus sp.</i> , <i>Bacillus sp.</i>
Proteína limpiadora de látex	-	<i>Streptomyces sp.</i> K30

Asimismo, la lacasa de *Psychrobacter sp.* NJ228 demostró ser competente para reducir la hidrofobicidad y cristalinidad del PE, lo cual sugiere un mecanismo de acción en la degradación del polímero (Jin et al., 2023).

La enzima manganeso peroxidasa (MnP), por su parte, desempeña un papel crucial en la biodegradación del PE, especialmente en hongos de la podredumbre blanca como *Phanerochaete chrysosporium*. Según la revisión de Ghatge et al. (2020), la cepa ME-446 y el aislado IZU-154 de este hongo han mostrado una actividad significativa en la degradación del PE, especialmente en presencia de tensioactivos y de iones de manganeso. La MnP no solo es producida por hongos, sino también por bacterias como *Bacillus cereus*, y su secreción mejora notablemente cuando se incuba con PE irradiado con UV (Zhang et al., 2022b).

En lo referente a la lignina peroxidasa (LiP), Ghatge et al. (2020) recogen un trabajo de Mukherjee y Kundu (2014) que describe la notable capacidad de *P. chrysosporium* para degradar el PE, logrando una pérdida de peso del 70% en el PE tratado térmicamente después de 15 días de incubación. Pero la actividad de la LiP no se limita a los hongos; la LiP extracelular de *Streptomyces* también puede degradar el PE tratado térmicamente (Ghatge et al., 2020; Zhang et al., 2022b).

Además, como se detalla en la revisión de Zhang et al. (2023b), existe una tercera peroxidasa identificada en estudios metagenómicos de *Alternaria alternata* FB1 relevante para la biodegradación del PE: la glutatión peroxidasa.

Por último, cabe mencionar la proteína limpiadora de látex de la cepa K30 de *Streptomyces sp.*; Zhang et al. (2022a) evidenciaron que inducía la ruptura de los dobles enlaces CC del PE oxidado por radiación UV, resultando en su degradación.

En general, estos estudios demandaron un tratamiento prolongado y se emplearon enzimas en estado crudo o solo parcialmente purificadas. Además, como ya se ha mencionado, se demostró que los consorcios microbiológicos formulados son más eficaces para degradar el PE que los microorganismos individuales (Ghatge et al., 2020). Los ensayos de biodegradación del PE proporcionan información importante sobre los mecanismos enzimáticos subyacentes, permitiendo su optimización para abordar la biorremediación de plásticos a gran escala.

5. DESAFÍOS EN LA BIODEGRADACIÓN DEL PE

La degradación microbiológica del PE enfrenta varios retos que dificultan su ejecución efectiva. Uno de los principales problemas es la baja eficiencia de degradación en comparación con tecnologías convencionales como el tratamiento térmico. Esta ineficiencia se debe a la falta de enzimas microbiológicas adecuadas y a la estructura fisicoquímica del PE, que resiste la biodegradación, agravada por su hidrofobicidad extrema (Taghavi et al., 2021; Zhang et al., 2022b).

Precisamente, la estructura compleja de las cadenas de carbono del PE deriva en la biodegradación parcial del polímero, pudiendo generar subproductos tóxicos, lo que subraya la necesidad de evaluar cuidadosamente su impacto ambiental. Además, en el entorno natural, los plásticos suelen mezclarse con otros desechos orgánicos biodegradables, que actúan como fuentes de carbono preferidas por los microorganismos. Esto reduce la probabilidad de que los microorganismos sinteticen enzimas específicas para la degradación del PE (Montazer et al., 2020; Taghavi et al., 2021; Zhang et al., 2022b).

A pesar de los avances en la identificación de microorganismos capaces de degradar el PE, la mayoría de los estudios solo han logrado una biodegradación incompleta, por lo que nace la necesidad de un sistema de evaluación estandarizado y estudios

más profundos a nivel de genes y proteínas para mejorar la comprensión de sus mecanismos moleculares (Montazer et al., 2020; Taghavi et al., 2021). El uso de organismos genéticamente modificados constituye una posible solución para mejorar la biodegradación, pero también plantea riesgos significativos, como la transferencia horizontal de genes y la fuga de microorganismos, lo que requiere estrictas medidas de seguridad biológica (Delangiz et al., 2022).

Otro desafío que tener en consideración es la formación de micro y nanoplasticos durante la biodegradación, o debido a factores abióticos como la exposición a radiación UV y calor, que pueden contaminar el suelo, los alimentos y el agua, afectando a las especies marinas y terrestres (Taghavi et al., 2021).

Para abordar las posibles dificultades en el proceso de biodegradación del PE, es esencial mejorar la eficiencia de su degradación, evaluar la toxicidad de los subproductos generados y desarrollar sistemas de análisis estandarizados.

6. INGENIERÍA DE LA BIORREMEDIACIÓN DEL PE

La biorremediación es una técnica de limpieza de ambientes contaminados que es efectiva, rentable y cada vez más utilizada. Este proceso implica la eliminación biológica de desechos en condiciones controladas, permitiendo la descomposición o desintoxicación de sustancias nocivas al proporcionar a los organismos los nutrientes y sustancias químicas necesarias para su desarrollo (Bala et al., 2022). Integra una amplia gama de biotecnologías ambientales y requiere enfoques multidisciplinarios que implementen herramientas innovadoras para aprovechar los procesos biológicos naturales en el suelo, agua y aire (Muter, 2023).

Dentro de la ingeniería de la biorremediación, se emplean diversas estrategias para abordar la contaminación, incluida la atenuación natural (Bala et al., 2022). Sin embargo, debido a la naturaleza recalcitrante del PE, esta estrategia por sí sola puede ser insuficiente. Por ello, se recurre a técnicas adicionales como la bioestimulación y la bioaumentación para optimizar las condiciones del metabolismo microbiológico en la degradación del PE.

La bioestimulación consiste en el ajuste de factores limitantes, como los nutrientes o las variables ambientales, para mejorar la tasa de biodegradación por los microorganismos autóctonos. La bioaumentación, por su parte, consiste en añadir

poblaciones microbiológicas alóctonas altamente concentradas y especializadas al sitio contaminado, siendo particularmente útil cuando no hay suficientes células microbiológicas nativas o cuando estas no poseen las rutas metabólicas necesarias para degradar los contaminantes (Tyagi et al., 2011).

A pesar de los avances recientes en la biodegradación de plásticos, no existe un consenso sobre qué biotecnología es la más efectiva. Sin embargo, es posible optimizar métodos combinados y avanzados de este proceso (Miri et al., 2022). La elección entre bioaumentación, bioestimulación o una combinación de ambas técnicas depende en gran medida de la capacidad degradativa de los microorganismos autóctonos y de la extensión de la contaminación del sitio. Además, cabe señalar que, aunque los estudios de laboratorio sobre biorremediación han mostrado resultados prometedores, estos no siempre se traducen en una descontaminación efectiva *in situ* (Tyagi et al., 2011).

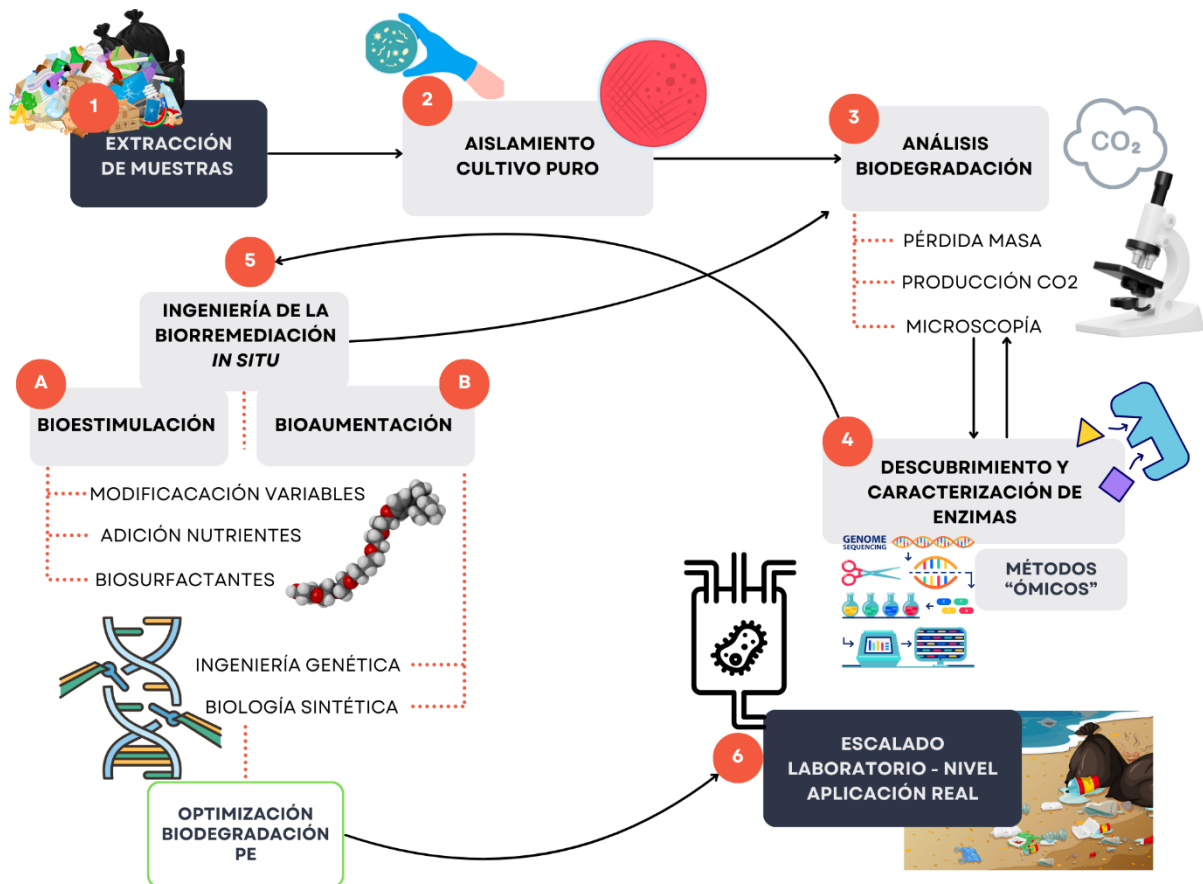


Fig. 3: Esquema del proceso de biorremediación “in situ” para la degradación microbiana del PE. Fuente: Elaboración propia utilizando el software Canva.

6.1. Bioestimulación

Numerosos estudios han explorado diversas técnicas de bioestimulación para optimizar el proceso de degradación microbiológica del PE. En la Tabla II, se recogen algunos de estos trabajos.

En primer lugar, como explican Eras-Muñoz et al. (2022), los biosurfactantes son potenciales candidatos para favorecer los procesos de la biorremediación, especialmente mediante bioestimulación y bioaumentación, ya que aumentan la solubilidad y biodisponibilidad de contaminantes hidrofóbicos. Estos metabolitos secundarios son producidos por bacterias, levaduras, hongos y arqueas. Los biosurfactantes son preferidos frente a los tensioactivos sintéticos por su baja toxicidad, alta biodegradabilidad y funcionalidad en un amplio rango de temperaturas, pH y salinidad. Un ejemplo es la surfactina producida por *Bacillus subtilis*, que facilita la colonización y degradación del PE al mejorar la hidrofobicidad y la accesibilidad del plástico a los microorganismos degradadores (Montazer et al., 2020).

En este contexto, un reciente estudio realizado por Nehal y Singh (2023) optimizó la producción de un biosurfactante lipopeptídico utilizando la cepa MZ540316 de *Bacillus sp.*, mejorando los componentes del medio y las condiciones de cultivo a través de modelos cinéticos y métodos estadísticos. La caracterización estructural y bioquímica del biosurfactante confirmó su capacidad para promover la degradación del LDPE más eficientemente que el HDPE. Además, se sugirió que el biosurfactante lipopeptídico secretado por esta cepa podría ser encapsulado con nanotransportadores para mejorar su potencial en la biodegradación de residuos de PE en el futuro.

En otro estudio, Kavitha y Bhuvaneshwari (2021) observaron que la cepa *Bacillus sp.* PE3, procedente de un suelo contaminado con desechos plásticos, desarrolló biopelículas en la superficie del LDPE y produjo enzimas ligninolíticas (lacasas, MnP y LiP) y un biosurfactante lipopeptídico. Esto sugiere que los microorganismos aislados de entornos naturales pueden degradar el PE y generar productos de valor añadido, como biosurfactantes, utilizando el PE como fuente de carbono.

Otra alternativa prometedora es el pretratamiento del PE mediante procesos termoquímicos como la pirólisis, que descompone el plástico en hidrocarburos de menor peso molecular, haciéndolos más accesibles para los microorganismos. Por ejemplo, Byrne et al. (2022) demostraron que la pirólisis del HDPE a altas

temperaturas (400 – 900 °C) genera hidrocarburos que pueden ser degradados por consorcios microbiológicos especializados en la remediación de derrames de petróleo, demostrando una rápida biodegradación y conversión de los desechos plásticos en biomasa microbiológica.

La estimulación con agentes oxidantes, como el H_2O_2 , es otra estrategia eficaz. Dicho agente crea un estrés oxidativo que induce la producción de enzimas oxidantes, como peroxidasa y catalasa, que catalizan la escisión oxidativa de los enlaces CC en el PE, mejorando su biodegradación. Mohammadi et al. (2022) publicaron un estudio en el que un consorcio bacteriano generador de peroxidasa, tratado con H_2O_2 , mostró una eficiencia de biodegradación del 22,5% —superior al no bioestimulado— en películas de LDPE.

El LDPE puede ser degradado por la luz solar, especialmente por radiación UV que rompe los enlaces poliméricos, causando decoloración y fragilidad (Dave et al., 2023). Este proceso se mejora con titanía (TiO_2) como fotocatalizador. Las nanopartículas de titanía (TNPs), sobre todo cuando se le añaden metales específicos, aumentan la eficiencia de la degradación bajo luz visible y son menos tóxicas para algunos microorganismos. Esta investigación probó que las TNPs recubiertas con proteínas ayudan a fragmentar el LDPE, facilitando su biodegradación por *Lactobacillus plantarum*.

Además, el uso de aditivos prooxidantes y biodegradables, como el almidón, ha demostrado mejorar la biodegradación del PE, al hacer más hidrofílico al polímero y facilitar la acción de enzimas como la amilasa (Miri et al., 2022).

Otra vía investigada es la optimización enzimática por la introducción de elementos como el cobre (Cu^{2+}) en ensayos de biodegradación del PE con lacasas, que ha demostrado aumentar la eficiencia hasta en un 75% (Zhang et al., 2022b).

Un último ejemplo de bioestimulación lo encontramos en el trabajo de Li et al. (2024), que estudiaron la biodegradación de microplásticos de PE por bacterias de sedimentos marinos introduciendo hierro (Fe^{3+}) y ácido cítrico. Al analizar los resultados, los autores propusieron dos nuevas vías de degradación de los microplásticos de PE: (i) colonización y oxidación superficial facilitada por los grupos funcionales generados por Fe^{3+} , y (ii) degradación catalizada por enzimas producidas por las bacterias bajo condiciones mejoradas con hierro.

Tabla II. Métodos de bioestimulación aplicados en diversos enfoques experimentales de la biorremediación del PE. Fuente: Elaboración propia.

Técnica de bioestimulación	Microorganismo(s)	Metodología	Referencia
Producción de biosurfactante lipopeptídico	<i>Bacillus sp.</i> MZ540316	Modelos cinéticos y estadísticos	Nehal y Singh (2023)
	<i>Bacillus sp.</i> PE3	Aislado en entorno natural	Kavitha y Bhuvaneshwari (2021)
Pirólisis	Consortios microbiológicos especializados	HDPE tratado a altas temperaturas	Byrne et al. (2022)
Agentes oxidantes (H ₂ O ₂)	Consortio bacteriano	Bioestimulación con H ₂ O ₂	Mohammadi et al. (2022)
Fotocatalizadores (TiO ₂)	<i>Lactobacillus plantarum</i>	TNPs recubiertas con proteínas bajo luz solar y visible	Dave et al. (2023)
Introducción de hierro (Fe ³⁺) y ácido cítrico	Bacterias de sedimentos marinos	Bioestimulación con Fe ³⁺	Li et al. (2024)

6.2. Bioaumentación

La bioaumentación, que implica la adición de microorganismos alóctonos y sus enzimas a zonas contaminadas, puede mejorar significativamente la biodegradación del PE al aumentar su eficiencia y reducir costes (Muter, 2023). No obstante, su implementación enfrenta desafíos como la competencia entre microorganismos y las variaciones ambientales, lo que requiere estudios detallados sobre las interacciones microbiológicas y el uso de tecnologías avanzadas como la ingeniería genética y la biología sintética (Bala et al., 2022; Mutser, 2023).

La ingeniería genética permite diseñar organismos modificados que degradan más eficazmente los contaminantes, mientras que el desarrollo de comunidades microbiológicas sintéticas optimiza la cooperación entre microorganismos para una biodegradación más eficiente (Bala et al., 2022). Las estrategias adaptadas, como la adición de cepas bacterianas preadaptadas y genes relevantes, son esenciales para adecuar la bioaumentación a las condiciones específicas de cada sitio contaminado (Tyagi et al., 2011).

Este enfoque ha demostrado ser eficaz en diversas condiciones experimentales y con diferentes consorcios de microorganismos.

Por ejemplo, en el estudio de Syranidou et al. (2017), se analizó la biodegradación de películas de LLDPE (polietileno de baja densidad lineal) recolectadas de playas bajo condiciones marinas simuladas. Se utilizaron comunidades de microorganismos autóctonas y bioaumentadas, observando que las biopelículas formadas por las bioaumentadas eran significativamente más eficientes en la degradación del PE. Estas comunidades también indujeron alteraciones en la cristalinidad y las propiedades reológicas del PE, lo cual ilustra su potencial para prevenir la formación de microplásticos en ambientes marinos.

Sarker et al. (2022), aplicaron la bioaumentación con *Enterobacter cloacae* AKS7 para mejorar la degradación del LDPE en un suelo contaminado. Los resultados mostraron que el tratamiento con *E. cloacae* AKS7, especialmente cuando el plástico fue pretratado con radiación UV, no solo mejoró la degradación del polímero, sino que también incrementó la diversidad funcional microbiológica del suelo.

A partir de *Streptomyces sp.*, Kong et al. (2024) optimizaron la bioenzima LcpK30 mediante la modificación con péptidos de anclaje LCI, que se unen específicamente al sustrato, ampliando así el espectro de acción enzimático y mejorando su eficacia degradativa. La proteína de fusión resultante, Lcp-LCI, mostró una mayor aptitud para unirse y degradar enlaces CC en el PE irradiado con UV, logrando una reducción de su masa molecular del 42,02%.

De manera similar, en el estudio de Gollan et al. (2023), se aplicó la bioaumentación utilizando lacasas de los géneros *Fusarium*, *Stenotrophomonas* y *Salipaludibacillus*, mejoradas con módulos de unión a carbohidratos (CBM) tipo A. Los CBM son polipéptidos que facilitan la adhesión de las enzimas a superficies específicas, incrementando así la descomposición de materiales como el PE. Mediante un enfoque bioinformático para seleccionar lacasas candidatas y dominios CBM, se encontró que distintos dominios CBM influían en la eficiencia de la despolimerización del PE, debido a que mejoraban la capacidad de las lacasas para adherirse al PE y catalizar su descomposición. Además, se identificó la nueva lacasa MCO1 como candidata para la oxidación industrial del PE. Los hallazgos también sugieren que la incorporación de bisagras flexibles en las quimeras de lacasa-CBM, que permiten flexibilidad y

movimiento entre los dominios de las proteínas, puede optimizar aún más la unión y oxidación del PE.

Los microorganismos psicrófilos producen enzimas altamente eficaces a bajas temperaturas, superando las limitaciones de las enzimas mesofílicas y termofílicas. Zhang et al. (2023a) implementaron una estrategia de exhibición en la superficie celular utilizando la proteína nucleadora de hielo, que contiene motivos de anclaje capaces de interactuar con la membrana. Esta estrategia permite fijar la proteína de interés a la membrana externa de células hospedadoras como *Escherichia coli*. De este modo, los investigadores lograron expresar funcionalmente la lacasa PsLAC del psicrófilo *Psychrobacter sp.*, optimizando la producción de lacasas activas a bajas temperaturas para la degradación de PE en climas fríos.

Por otra parte, Skariyachan et al. (2021) formularon 10 consorcios bacterianos utilizando cepas aisladas de muestras de estiércol de vaca y evaluaron su capacidad para degradar películas de LDPE. El consorcio bacteriano CB3, que incluía representantes de los géneros *Enterobacter* y *Pseudomonas*, mostró la mayor eficiencia en la degradación del LDPE.

En los últimos años, se ha descubierto que insectos como los gusanos de la harina pueden degradar plásticos gracias a la simbiosis con su microbiota intestinal. Según el artículo de Liu et al. (2023), estos gusanos secretan factores que mejoran la biodisponibilidad del PE y facilitan la adhesión de bacterias degradadoras como *Spiroplasma*, *Lactococcus* y *Enterococcus*. Este mecanismo ofrece una base para el desarrollo de "ecosistemas artificiales" destinados a la eliminación de residuos plásticos.

Finalmente, la ingeniería genética también ha permitido modificar microorganismos para aumentar su capacidad degradativa. Herramientas como CRISPR/Cas9 y TALENS podrían ser utilizadas para insertar genes degradadores de plásticos en microorganismos, mejorando su eficiencia en la biodegradación del PE (Miri et al., 2022). La expresión de enzimas como las AH y las citocromo P450 en cepas bacterianas modificadas ha demostrado un aumento en la degradación de este plástico en diversos estudios recogidos en las revisiones de Jin et al. (2023) y Zhang et al. (2022b).

Resumiendo, la combinación de bioaumentación, bioestimulación y la adición de biosurfactantes, adaptadas a las características del sitio contaminado, puede ser una estrategia prometedora para la biodegradación del PE. Sin embargo, es crucial acompañar estas intervenciones con estudios de ecotoxicidad del lugar para asegurar la recuperación de su integridad natural (Tyagi et al., 2011).

Tabla III. Estrategias de bioaumentación utilizadas en diferentes abordajes experimentales de la biorremediación del PE. Fuente: Elaboración propia.

Técnica de bioaumentación	Microorganismo(s)	Metodología	Referencia
Biodegradación de películas de LLDPE bajo condiciones marinas simuladas	Comunidades microbiológicas autóctonas y bioaumentadas	Análisis biodegradación por comunidades autóctonas y bioaumentadas	Syranidou et al. (2017)
Bioaumentación con <i>Enterobacter cloacae</i> AKS7	<i>Enterobacter cloacae</i> AKS7	Aplicación de AKS7 en suelo contaminado con LDPE pretratado con UV	Sarker et al. (2022)
Optimización bioenzima LcpK30	<i>Streptomyces</i> sp.	Modificación de LcpK30 con péptidos de anclaje LCI	Kong et al. (2024)
Optimización lacasas	<i>Fusarium</i> , <i>Stenotrophomonas</i> , <i>Salipaludibacillus</i>	Uso de módulos de unión a carbohidratos (CBM) tipo A	Gollan et al. (2023)
Producción lacasa PsLAC	<i>Escherichia coli</i> , <i>Psychrobacter</i> sp.	Estrategia de exhibición en superficie celular	Zhang et al. (2023a)
Uso del consorcio CB3	<i>Enterobacter</i> , <i>Pseudomonas</i>	Consortios bacterianos formulados a partir de estiércol de vaca	Skariyachan et al. (2021)
“Ecosistema artificial”	<i>Spiroplasma</i> , <i>Lactococcus</i> , <i>Enterococcus</i>	Simbiosis de gusanos de la harina con su microbiota intestinal	Liu et al. (2023)

7. APLICACIONES POTENCIALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

La biodegradación microbiológica del PE presenta numerosas aplicaciones potenciales y perspectivas futuras que podrían revolucionar la gestión de residuos plásticos. No obstante, como se ha mencionado anteriormente, el éxito en condiciones controladas no asegura los mismos resultados *in situ*, por lo que es crucial realizar estudios de bioaumentación y bioestimulación tanto en el laboratorio como en el entorno natural para abordar posibles problemas ambientales (Tyagi et al., 2011).

La biotecnología en las plantas de tratamiento de aguas residuales, que interceptan microplásticos, ha surgido como una solución sostenible a nivel de aplicación real. El uso de técnicas de bioaumentación en sistemas como el lodo activado y los reactores de membrana enzimáticos, que utilizan biocatalizadores, ofrece oportunidades prometedoras para eliminar estos contaminantes, si bien su eficiencia es variable y enfrenta desafíos como la biodegradación parcial (Tang y Hadibarata, 2022).

Recientemente, han cobrado relevancia los estudios de plásticos biodegradables, en donde se ha investigado la adición de compuestos degradables, como el almidón o el maíz, al PE. Estos plásticos son más hidrofílicos y permiten una mayor colonización microbiana. No obstante, la degradación a menudo se limita a los componentes biodegradables, dejando el PE sin degradar (Taghavi et al., 2021). Además, la producción de plásticos biodegradables no resuelve la crisis global de residuos plásticos, subrayando la necesidad de desarrollar métodos más eficientes para degradar los desechos plásticos existentes.

Por otra parte, la valorización de los productos de biodegradación del plástico mediante lo que se denomina reciclaje ascendente ejemplifica una estrategia innovadora para lograr una economía circular; en lugar de simplemente reciclar plásticos, sus hidrolizados pueden usarse para la síntesis de nuevos compuestos de valor añadido mediante ingeniería metabólica. Sin embargo, la economía global aún no está preparada para adoptar completamente este sistema debido a la falta de tecnologías rentables y adecuadas para gestionar diferentes polímeros plásticos (Andler et al., 2022; Singh Jadaun et al., 2022).

Desde una perspectiva futura, la bioaumentación y la bioestimulación prometen ser técnicas complementarias para la remediación de sitios contaminados. Para adaptar las estrategias de biodegradación del PE a cada lugar, es necesario el desarrollo de "fórmulas microbianas" basadas en la capacidad degradativa de los microorganismos, sus redes metabólicas y sus requerimientos de crecimiento (Tyagi et al., 2011).

La biorremediación es una ciencia multidisciplinaria que abarca, por ejemplo, la identificación de consorcios microbianos eficientes, el uso de métodos "ómicos", la optimización de microorganismos modificados, la inteligencia artificial y la ingeniería de rutas de cepas. Estos avances pueden descubrir nuevos genes para estudios de

evolución dirigida, así como acelerar el proceso de la biodegradación del PE, mejorar la comprensión de su impacto ambiental y garantizar la bioseguridad en aplicaciones reales (Cowan et al., 2022; Singh Jadaun et al., 2022; Thapliyal et al., 2024).

8. CONCLUSIONES

En los últimos años, numerosos estudios abordan la problemática de la contaminación plástica, centrándose en la biodegradación del PE mediante microorganismos. La investigación destaca la naturaleza recalcitrante del PE debido a sus propiedades fisicoquímicas, lo que dificulta su degradación en el medio ambiente. Sin embargo, los novedosos avances en biorremediación brindan medidas alentadoras para mitigar este problema.

Dentro de la biorremediación, la bioestimulación y la bioaumentación emergen como estrategias efectivas para optimizar la biodegradación del PE. Los trabajos consultados demuestran que estos métodos pueden aumentar de manera notable su biodegradación, aunque su aplicación *in situ* no ha sido significativamente estudiada y requiere un análisis detallado de su impacto ecotoxicológico en el lugar para asegurar la recuperación ecológica.

En definitiva, aunque la biodegradación microbiológica del PE presenta un enorme potencial, su implementación efectiva requiere superar múltiples desafíos técnicos y ambientales. La combinación de diferentes técnicas de biorremediación representa una solución integral y prometedora para abordar estos retos y, de este modo, atenuar la contaminación plástica por PE. La investigación futura en este campo debe enfocarse en mejorar la eficiencia de degradación y desarrollar aplicaciones prácticas sostenibles de biorremediación *in situ* para diversos entornos contaminados por estos plásticos, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y a la salud de los ecosistemas.

CONCLUSIÓN

Nos últimos años, numerosos estudios abordan a problemática da contaminación plástica, centrándose na biodegradación do PE mediante microorganismos. A investigación destaca a natureza recalcitrante do PE debido ás súas propiedades fisicoquímicas, o que dificulta a súa degradación no medio ambiente. Porén, os

avances novedosos en biorremediación ofrecen medidas alentadoras para mitigar este problema.

Dentro da biorremediación, a bioestimulación e a bioaumentación emerxen como estratexias efectivas para optimizar a biodegradación do PE. Os traballos consultados demostran que estes métodos poden aumentar de xeito notable a súa biodegradación, aínda que a súa aplicación *in situ* non foi significativamente estudada e require unha análise detallada do seu impacto ecotoxicolóxico no lugar para asegurar a recuperación ecolóxica.

En definitiva, aínda que a biodegradación microbiolóxica do PE presenta un enorme potencial, a súa implementación efectiva require superar múltiples desafíos técnicos e ambientais. A combinación de diferentes técnicas de biorremediación representa unha solución integral e prometedora para abordar estes retos e, deste modo, atenuar a contaminación plástica por PE. A investigación futura neste campo debe enfocarse en mellorar a eficiencia de degradación e desenvolver aplicacións prácticas sostibles de biorremediación *in situ* para diversas contornas contaminadas por estes plásticos, contribuíndo así á sostibilidade ambiental e á saúde dos ecosistemas.

CONCLUSIONS

In recent years, numerous studies have addressed the issue of plastic pollution, focusing on the biodegradation of PE by microorganisms. Research highlights the recalcitrant nature of PE due to its physicochemical properties, which hinders its degradation in the environment. However, novel advances in bioremediation provide encouraging measures to mitigate this problem.

Within bioremediation, biostimulation and bioaugmentation emerge as effective strategies to optimize the biodegradation of PE. The reviewed studies demonstrate that these methods can markedly enhance its biodegradation, although their *in situ* application has not been significantly studied and requires a detailed analysis of their ecotoxicological impact on-site to ensure ecological recovery.

In conclusion, although the microbiological biodegradation of PE presents enormous potential, its effective implementation requires overcoming multiple technical and environmental challenges. The combination of different bioremediation techniques represents an integral and promising solution to address these challenges and thereby

mitigate plastic pollution by PE. Future research in this field should focus on improving degradation efficiency and developing sustainable practical applications of *in situ* bioremediation for various environments contaminated by these plastics, thus contributing to environmental sustainability and ecosystem health.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, R., Hamid, A. K., Krebsbach, S. A., He, J. y Wang, D. (2022). Critical review of microplastics removal from the environment. *Chemosphere*, 293: 133557. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133557>
- Ali, S. S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Zhu, D., Mahmoud, Y. A. G., Koutra, E., Metwally, M. A., Kornaros, M. y Sun, J. (2021). Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. *Science of the Total Environment*, 780: 146590. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590>
- Andler, R., Tiso, T., Blank, L., Andreeßen, C., Zampolli, J., D'Afonseca, V., Guajardo, C. y Díaz-Barrera, A. (2022). Current progress on the biodegradation of synthetic plastics: From fundamentals to biotechnological applications. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 21(4): 829–850. <https://doi.org/10.1007/s11157-022-09631-2>
- Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B. V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B. S. y Tripathi, M. (2022). Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: A review for a green and sustainable environment. *Toxics*, 10(8): 484. <https://doi.org/10.3390/toxics10080484>
- Byrne, E., Schaerer, L. G., Kulas, D. G., Ankathi, S. K., Putman, L. I., Codere, K. R., Schum, S. K., Shonnard, D. R. y Techtman, S. M. (2022). Pyrolysis-aided microbial biodegradation of high-density polyethylene plastic by environmental inocula enrichment cultures. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 10(6): 2022–2033. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c05318>
- Cai, Z., Li, M., Zhu, Z., Wang, X., Huang, Y., Li, T., Gong, H. y Yan, M. (2023). Biological degradation of plastics and microplastics: A recent perspective on associated mechanisms and influencing factors. *Microorganisms*, 11(7): 1661. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071661>
- Cowan, A. R., Costanzo, C. M., Benham, R., Loveridge, E. J. y Moody, S. C. (2022). Fungal bioremediation of polyethylene: Challenges and perspectives. *Journal of Applied Microbiology*, 132(1): 78–89. <https://doi.org/10.1111/jam.15203>
- Dave, D., Chauhan, K., Khimani, A., Soni, K. y Vaidya, Y. (2023). Photocatalytic degradation of low-density polythene using protein-coated titania nanoparticles and *Lactobacillus plantarum*. *Environmental Technology* 44(5): 619–630. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1980828>
- Delangiz, N., Aliyar, S., Pashapoor, N., Nobaharan, K., Asgari Lajayer, B. y Rodríguez-Couto, S. (2022). Can polymer-degrading microorganisms solve the bottleneck of plastics' environmental challenges? *Chemosphere*, 294: 133709. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133709>

- El-Sherif, D. M., Eloffy, M. G., Elmesery, A., Abouzid, M., Gad, M., El-Seedi, H. R., Brinkmann, M., Wang, K. y Al Naggat, Y. (2022). Environmental risk, toxicity, and biodegradation of polyethylene: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54): 81166–81182. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23382-1>
- Eras-Muñoz, E., Farré, A., Sánchez, A., Font, X. y Gea, T. (2022). Microbial biosurfactants: A review of recent environmental applications. *Bioengineered*, 13(5): 12365–12391. Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2074621>
- Esmaeili, A., Pourbabae, A. A., Alikhani, H. A., Shabani, F. y Esmaeili, E. (2013). Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by mixed culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in soil. *PLoS ONE*, 8(9): e71720 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071720>
- Ghatge, S., Yang, Y., Ahn, J. H. y Hur, H. G. (2020). Biodegradation of polyethylene: A brief review. *Applied Biological Chemistry*, 63(1): 27. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00511-3>
- Gollan, M., Black, G. y Munoz-Munoz, J. (2023). A computational approach to optimising laccase-mediated polyethylene oxidation through carbohydrate-binding module fusion. *BMC Biotechnology*, 23(1): 18. <https://doi.org/10.1186/s12896-023-00787-5>
- Jin, J., Arciszewski, J., Auclair, K. y Jia, Z. (2023). Enzymatic polyethylene biorecycling: Confronting challenges and shaping the future. *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132449. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132449>
- Kavitha, R. y Bhuvanewari, V. (2021). Assessment of polyethylene degradation by biosurfactant producing ligninolytic bacterium. *Biodegradation*, 32(5): 531–549. <https://doi.org/10.1007/s10532-021-09949-8>
- Kong, D., Zhang, H., Yuan, Y., Wu, J., Liu, Z., Chen, S., Zhang, F. y Wang, L. (2024). Enhanced biodegradation activity toward polyethylene by fusion protein of anchor peptide and *Streptomyces* sp. strain K30 latex clearing protein. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264: 130378. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130378>
- Li, X., Li, G., Wang, J., Li, X., Yang, Y. y Song, D. (2024). Elucidating polyethylene microplastic degradation mechanisms and metabolic pathways via iron-enhanced microbiota dynamics in marine sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 466: 133655. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133655>
- Li, X., Wu, S., Dong, Y., Fan, H., Bai, Z. y Zhuang, X. (2021). Engineering microbial consortia towards bioremediation. *Water*, 13(20), 2928. <https://doi.org/10.3390/w13202928>
- Liu, Q., Wu, H., Sun, W., Lu, Y. y Zhang, H. (2023). Cooperation between *Tenebrio molitor* (mealworm larvae) and their symbiotic microorganisms improves the bioavailability of polyethylene. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(9): 3925–3936. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02843-9>
- Miri, S., Saini, R., Davoodi, S. M., Pulicharla, R., Brar, S. K. y Magdoui, S. (2022). Biodegradation of microplastics: Better late than never. *Chemosphere*, 286, 131670. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131670>
- Mohammadi, S., Moussavi, G. y Rezaei, M. (2022). Enhanced peroxidase-mediated biodegradation of polyethylene using the bacterial consortia under H₂O₂-biostimulation. *Polymer*, 240, 124508. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.124508>

- Montazer, Z., Najafi, M. B. H. y Levin, D. B. (2020). Challenges with verifying microbial degradation of polyethylene. *Polymers*, 12(1), 123. <https://doi.org/10.3390/polym12010123>
- Muter, O. (2023). Current trends in bioaugmentation tools for bioremediation: A critical review of advances and knowledge gaps. *Microorganisms*, 11(3), 710. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030710>
- Nehal, N. y Singh, P. (2023). Optimization of cultural condition of *Bacillus* sp. MZ540316: Improve biodegradation efficiency of lipopeptide biosurfactant against polyethylene. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(17), 15471–15487. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02042-3>
- Rogers, K. L., Carreres-Calabuig, J. A., Gorokhova, E. y Posth, N. R. (2020). Micro-by-micro interactions: How microorganisms influence the fate of marine microplastics. *Limnology and Oceanography Letters*, 5(1), 18–36. <https://doi.org/10.1002/lol2.10136>
- Santoro, A. E. (2016). The do-it-all nitrifier: The discovery of bacteria that can oxidize both ammonia and nitrite upends a long-held dogma. *Science*, 351(6271), 342–343. <https://doi.org/10.1126/science.aad9839>
- Sarker, R. K., Chakraborty, P., Sarkar, S., Ghosh, M. M. y Tribedi, P. (2022). Bioaugmentation of *Enterobacter cloacae* AKS7 causes an enhanced degradation of low-density polyethylene (LDPE) in soil: A promising approach for the sustainable management of LDPE waste. *Archives of Microbiology*, 204(1): 74. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02645-4>
- Sharma, B. y Jain, P. (2020). Deciphering the advances in bioaugmentation of plastic wastes. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123241>
- Singh, P. y Marchant, R. (2015). Microbial degradation of polyethylene terephthalate. *Indian Journal of Microbiology*, 55(3), 250-265. <https://doi.org/10.1007/s12088-015-0525-5>
- Singh Jadaun, J., Bansal, S., Sonthalia, A., Rai, A. K. y Singh, S. P. (2022). Biodegradation of plastics for sustainable environment. *Bioresource Technology*, 347, 126697. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126697>
- Skariyachan, S., Taskeen, N., Kishore, A. P., Krishna, B. V. y Naidu, G. (2021). Novel consortia of *Enterobacter* and *Pseudomonas* formulated from cow dung exhibited enhanced biodegradation of polyethylene and polypropylene. *Journal of Environmental Management*, 284: 112030. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112030>
- Syranidou, E., Karkanorachaki, K., Amorotti, F., Repouskou, E., Kroll, K., Kolvenbach, B., Corvini, P. F. X., Fava, F. y Kalogerakis, N. (2017). Development of tailored indigenous marine consortia for the degradation of naturally weathered polyethylene films. *PLoS ONE*, 12(8): e0183984. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183984>
- Taghavi, N., Udugama, I. A., Zhuang, W. Q. y Baroutian, S. (2021). Challenges in biodegradation of non-degradable thermoplastic waste: From environmental impact to operational readiness. *Biotechnology Advances*, 49: 107731. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107731>
- Tang, K. H. D. y Hadibarata, T. (2022). The application of bioremediation in wastewater treatment plants for microplastics removal: A practical perspective. *Bioprocess and*

Biosystems Engineering, 45(11), 1865–1878. <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02793-x>

- Temporiti, M. E. E., Nicola, L., Nielsen, E. y Tosi, S. (2022). Fungal enzymes involved in plastics biodegradation. *Microorganisms*, 10(6): 1180. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061180>
- Thapliyal, C., Priya, A., Singh, S. B., Bahuguna, V. y Daverey, A. (2024). Potential strategies for bioremediation of microplastic contaminated soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.05.001>
- Tyagi, M., da Fonseca, M. M. R. y de Carvalho, C. C. C. R. (2011). Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation*, 22(2), 231–241. <https://doi.org/10.1007/s10532-010-9394-4>
- Yao, C., Xia, W., Dou, M., Du, Y. y Wu, J. (2022a). Oxidative degradation of UV-irradiated polyethylene by laccase-mediator system. *Journal of Hazardous Materials*, 440: 129709 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129709>
- Yao, Z., Seong, H. J. y Jang, Y. S. (2022b). Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 242: 113933 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113933>
- Zhang, A., Hou, Y., Wang, Y., Wang, Q., Shan, X. y Liu, J. (2023a). Highly efficient low-temperature biodegradation of polyethylene microplastics by using cold-active laccase cell-surface display system. *Bioresource Technology*, 382: 129164 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129164>
- Zhang, C., Mu, Y., Li, T., Jin, F. J., Jin, C. Z., Oh, H. M., Lee, H. G. y Jin, L. (2023b). Assembly strategies for polyethylene-degrading microbial consortia based on the combination of omics tools and the “Plastisphere.” *Frontiers in Microbiology*, 14: 1181967. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1181967>
- Zhang, H., Kong, D., Wang, L., Xia, W., Yao, C. y Wu, J. (2022a). Degradation of UV-pretreated polyolefins by latex clearing protein from *Streptomyces* sp. Strain K30. *Science of the Total Environment*, 806: 150779 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150779>
- Zhang, Y., Pedersen, J. N., Eser, B. E. y Guo, Z. (2022b). Biodegradation of polyethylene and polystyrene: From microbial deterioration to enzyme discovery. *Biotechnology Advances*, 60: 107991. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107991>