

Perspectivas actuales: biotransformación de polietilenteraftalato, polietileno y cloruro de polivinilo mediada por hongos y bacterias

Laura Juliana Leal Lugo

Asesora

Juliana Rivera Cano

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Especialización en Biotecnología Agroambiental

2024

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia, por ser mi pilar y apoyar este y muchos más sueños que construyen mi proyecto de vida. A mi papá por tener siempre la palabra perfecta, por cada demostración de amor y por enseñarme que amar lo que se hace, no tiene precio. A mi mamá por mostrarme que todos los matices de la vida se pueden acompañar con una sonrisa, por demostrarme que luchar por lo que se quiere siempre valdrá la pena. A mi hermano que ha sido mi fortaleza y que, entre risas, me ha despejado días opacos, sus sueños son los míos, lo admiro y sé que llegará lejos siendo la persona bonita que es. A mi abuelita que siempre ha sido muestra de amor, unión y perseverancia, además de ser el tesoro más lindo de mi vida.

A mi novio, que ha sido mi bastón y me ha acompañado en este viaje maravilloso que fue vivir de manera apasionada y sentida mi paso por la especialización, gracias por mostrarme de mil maneras que siempre puedo, y que la vida se vuelve más bonita cuando se trabaja en equipo para cumplir todos nuestros sueños conjuntos e individuales.

A mi mejor amiga Marcela, que con ternura me ha enseñado lo bonito que es tener un apoyo, a Dani porque siempre hay un gesto para hacernos sentir que ahí estamos; a Edna por demostrarme que, a pesar a pesar de poder sola, la admiración y la motivación entre los amigos también pueden llevarnos lejos. Gracias por darme aliento cuando estoy a punto de caer.

A la profesora Juliana Rivera principalmente, porque vio en mí talentos olvidados, por creer en mí y por siempre tener la palabra correcta de motivación. Adicionalmente, a BCC Publishing Staff, 2023, por brindarme el estudio de mercado “*Microbial Products: Technologies, Applications and Global Markets*”. A la UNAD por brindarme herramientas académicas de trabajo autónomo y por el espacio para retarme como profesional, y ahora como especialista.

Resumen

El uso de plásticos hace parte de la mayoría de las acciones diarias mediante envoltorios de productos alimenticios, embalaje, construcción, instrumental industrial, entre otras. Debido a la acumulación de residuos plásticos desde hace décadas, se han generado problemas medioambientales representado en emisiones que contribuyen al efecto invernadero, contaminación de fuentes hídricas ocasionadas por los lixiviados de la degradación de los plásticos, y especies comprometidas debido a la ingesta de estos materiales. Tres de los principales termoplásticos producidos y comercializados actualmente son el polietilenteraftalato (PET), polietileno (PE) y cloruro de polivinilo (PVC) representando aproximadamente el 90% de los plásticos en general; debido a la masificación de estos, su reciclaje no es suficiente para mitigar su impacto medioambiental.

La biotransformación de estos termoplásticos mediada por hongos y bacterias se plantea como una de las posibles soluciones a partir de acciones enzimáticas. Desde los años 70, se ha podido observar la colonización microbiana en los microplásticos de estos materiales. En esta investigación, se identifican estudios que describen la biotransformación de PET, PE y PVC mediada por hongos y bacterias desarrollados hasta la actualidad para plantear una alternativa para la gestión de residuos plásticos.

Palabras claves: Tereftalato de polietileno; polietileno; cloruro de polivinilo; biodegradación, biorremediación; método/proceso; biotecnología.

Abstract

The use of plastics is involved in all daily activities, including food product packaging, construction, and industrial tools, among others. Due to decades of plastic waste accumulation, significant environmental problems such as emissions which contribute to greenhouse effects, water sources contamination due to leachate from degrading plastics, and harm to species that ingest these materials.

Three of the primary thermoplastics currently in production and on the market are polyethylene terephthalate (PET), polyethylene (PE), and polyvinyl chloride (PVC), which together represent approximately 90% of all plastics. Due to their prevalence, current recycling efforts are insufficient to mitigate their environmental impact. The biotransformation of these thermoplastics by fungi and bacteria, leveraging enzymatic actions, is proposed as a potential solution. Since the 1970s, microbial colonization on microplastics has been observed. This research identifies studies that describe the biotransformation of PET, PE, and PVC by fungi and bacteria, offering an alternative approach for managing plastic waste.

Keywords: Polyethylene terephthalate; polyethylene; polyvinyl chloride; biodegradation, bioremediation; method / process; biotech.

Tabla de Contenido

Introducción	10
Objetivos	12
Objetivo General	12
Objetivos Específicos	12
Transformación De PET, PE Y PVC, Revisión Histórica	13
Definición y Características de PET, PE y PVC	13
Definición y Características del PET	13
Definición y Características del PE	14
Definición y Características del PVC	15
Historia y Usos de PET, PET y PVC	16
Historia y Uso del PET	17
Historia y Uso del PE	18
Historia y Uso del PVC	18
Contexto Ambiental del PET, PE y PVC	19
Contexto Ambiental del PET	19
Contexto Ambiental del PE	21
Contexto Ambiental del PVC	22
Procesos Convencionales de Gestión de Residuos de PET, PE y PVC	23
Gestión De Residuos Plásticos en Vertederos	23
Incineración de Residuos Plásticos	25
Pirólisis Catalítica	27
Biotransformación de PET, PE y PVC Mediada por Hongos y Bacterias	30
Biodegradación y Biotransformación	30

Biodegradación y Biotransformación de Plásticos Mediada por Microorganismos.	33
Bacterias Y Hongos: Géneros y Especies Biodegradadores de Plástico.....	38
Mecanismos de Acción para la Biotransformación y Biodegradación de Plásticos Mediada por Microorganismos.....	48
Investigaciones y Patentes Relacionadas con la Biodegradación y Biotransformación de PET, PE y PVC Mediada por Hongos y Bacterias.....	54
Proceso de Biodegradación y Biotransformación de PET, PE y PVC Mediada por Hongos y Bacterias	65
Selección de Materiales Poliméricos.....	67
Viabilidad desde los Factores Tecnológicos	75
Proceso de Biodegradación de PET, PE y PVC	76
Estudio de mercado	81
Marco Regulatorio	87
Regulaciones Ambientales del Plástico a Nivel Internacional y Nacional	89
Regulaciones Internacionales	91
Regulación Nacional.....	99
Organizaciones Nacionales e Internacionales	102
Organizaciones Internacionales.....	102
Organizaciones Nacionales.....	105
Conclusiones	107
Referencias.....	109

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Estructura Química del PET.</i>	13
Figura 2 <i>Polimerización del Etileno: Obtención de Polipropileno.</i>	14
Figura 3 <i>Estructura Molecular 3D del Monómero Cloruro de Etilo.</i>	16
Figura 4 <i>Proceso Convencional de Gestión de Residuos Plásticos: Incineración.</i>	26
Figura 5 <i>Pirólisis Catalítica de Residuos Plásticos.</i>	28
Figura 6 <i>Línea del Tiempo del Origen y Contexto del Plástico hasta el Año 2019.</i>	30
Figura 7 <i>Tipos de Microorganismos Presentes en la Plasticsfera.</i>	36
Figura 8 <i>Mecanismo de Degradación de Plástico a partir de Reacciones Fisicoquímicas del Medio Ambiente, y Despolimerización de Plásticos Mediada por Microorganismos.</i>	49
Figura 9 <i>Despolimerización de Plástico Generada a partir de la Acción Enzimática de Hongos y Bacterias.</i>	51
Figura 10 <i>Enzimas que Actúan en la Degradación de los Plásticos PE, PP, PS, PET, PUR Y PCB y, su Potencial de Degradación de Plásticos.</i>	52
Figura 11 <i>Árbol Filogenético de las Bacterias y Hongos Biodegradadores de Plástico que Presentan la Enzima PET Hidrolasa Clasificadas por Filo.</i>	53
Figura 12 <i>Familias de Patentes y Registro de estas hasta el Día 3 De Junio de 2024 Relacionada con los Desarrollos Biotecnológicos sobre Biodegradación de PET, PE y PVC. ..</i>	55
Figura 13 <i>Artículos Citados por Patentes y Trabajos de Investigación Relacionados con estas hasta el Día 31 de Mayo de 2024 sobre la Biodegradación de PET, PE y PVC.</i>	56
Figura 14 <i>Microorganismos Utilizados en el Grupo Simplificado de Patentes de Biodegradación y Biotransformación de PET, PE y PVC.</i>	58

Figura 15 <i>Principales Propietarios Intelectuales de las Patentes Relacionadas con la Biodegradación de Residuos Plásticos (PET, PE y PVC).</i>	59
Figura 16 <i>Histórico de Artículos Citados por Patentes Relacionadas con la Biodegradación y Biotransformación de PET, PE y PVC.</i>	60
Figura 17 <i>Total de Publicaciones Académicas Relacionados con la Biodegradación de Plásticos PET, PE y PVC.</i>	61
Figura 18 <i>Principales Instituciones con Artículos Citados en Patentes.</i>	62
Figura 19 <i>Países que Participan en el Reporte de Patentes, Aplicación de Patentes y Patentes Conocidas de Biodegradación y Biotransformación de PET, PE y PVC Mediada por Microorganismos.</i>	63
Figura 20 <i>Análisis Bibliométrico de Artículos Científicos Citados por Patentes Relacionadas con Métodos y/o Procesos de Biodegradación de PET, PE y PVC.</i>	64
Figura 21 <i>Proceso de Biodegradación del Plástico Mediado por Microorganismos.</i>	66
Figura 22 <i>Proceso Estandarizado en Biorreactor de la Biodegradación de PET, PE y PVC.</i> ...	73
Figura 23 <i>Identificación de la Vía Metabólica para la Biodegradación de Plástico Mediada por Microorganismos.</i>	77
Figura 24 <i>Resumen Gráfico de las Etapas del Proceso de Degradación Biotecnológica en el Marco de la Sugerencia de un Proyecto de Investigación para la UNAD.</i>	81
Figura 25 <i>Producción de Botellas con PET 100% Reciclado por Carbios y L'OCCITANTE.</i> ...	85
Figura 26 <i>Cadena de Valor del Plástico.</i>	88
Figura 27 <i>Países que Implementan Políticas de Prohibición Total de Bolsas Plásticas, Prohibición o Impuesto Parcial, o Impuesto.</i>	90
Figura 28 <i>Regulación Continental de Producción y Uso de Plásticos.</i>	92

Figura 29 <i>Gobiernos Firmantes del Compromiso Global para la Nueva Economía del Plástico hasta el 2023.</i>	94
Figura 30 <i>Recaudo de la DIAN Mediante el Impuesto Nacional al Consumo de Bolsas Plásticas y Uso de Bolsas Plásticas de un Solo Uso en Colombia.</i>	100

Lista de Tablas

Tabla 1 Principales Géneros de Hongos y Bacterias Degradadores de Plástico.....	40
Tabla 2 <i>Genes Relacionados con la Degradación de Plástico.</i>	54
Tabla 3 <i>Monómeros de Algunos Plásticos.</i>	67
Tabla 4 <i>Gobiernos nacionales firmantes del Compromiso Global para la Nueva Economía del Plástico</i>	95
Tabla 5 <i>Gobiernos Subnacionales Firmantes del Compromiso Global para la Nueva Economía del Plástico.</i>	96
Tabla 6 <i>Gobiernos Municipales Firmantes del Compromiso Global para la Nueva Economía del Plástico.</i>	97
Tabla 7 <i>Países de Latinoamérica con Regulación sobre la Producción y Uso de Plásticos de un Solo Uso.</i>	98
Tabla 8 <i>Principales Organizaciones Internacionales con Mayor Compromiso ante el Impacto Ambiental del Plástico.</i>	103
Tabla 9 <i>Principales Organizaciones Nacionales con Mayor Compromiso ante el Impacto Ambiental del Plástico.</i>	105

Introducción

En el siglo XX, se dio inicio a la fabricación de polímeros sintéticos y desde entonces, los plásticos se han convertido en materiales indispensables en actividades humanas e industriales de diferentes sectores por sus características, bajo costo de producción y amplia gama de utilidad (Melchor-Martínez et al., 2022). Sin embargo, la acumulación de los residuos plásticos en diferentes ecosistemas en las últimas décadas ha tenido un gran impacto ambiental afectando a la flora, fauna, agua, suelo, aire y microorganismos (Stapleton & Hai, 2023). Los microplásticos generados por la degradación de estos residuos, son contaminantes de creciente preocupación debido a su presencia en todos los entornos ambientales, incluidos la atmósfera, ecosistemas terrestres y acuáticos. Estos contienen sustancias tóxicas desde su fabricación, o en su recolección durante el paso por el medio ambiente, incluyendo patógenos, microorganismos que no son propios del medio ambiente, hidrocarburos aromáticos y metales (Miri et al., 2022).

La comercialización y acumulación de estos materiales ha demostrado que, al día de hoy, no es suficiente su reciclaje, por lo que se ha sugerido la fabricación de productos que puedan suplir a los plásticos sintéticos (Atiweh et al., 2021). Entre los principales termoplásticos producidos y comercializados se encuentran el polietilentereftalato (PET), polietileno (PE) y cloruro de polivinilo (PVC), que representan un gran porcentaje de los plásticos producidos, algunas investigaciones sobre biorremediación, plantean la biodegradación de los termoplásticos PET, PE y PVC mediante el uso de microorganismos específicos cuyos procesos enzimáticos logran la biotransformación de estos materiales (Rosato et al., 2020).

La plastisfera es la comunidad microbiana relacionada con los residuos plásticos; estos microorganismos colonizan sus superficies y consecuentemente llevan a cabo su biodegradación a partir de rutas enzimáticas propias y adaptadas a su ecosistema (Amaral-Zettler et al., 2020). La

biodegradación mediada por hongos y bacterias ha sido de gran interés en los últimos años, como una estrategia sostenible ante la contaminación ambiental provocada por los residuos plásticos. Las investigaciones relacionadas tratan herramientas complejas como la genómica para la identificación de los microorganismos de la plastisfera y la evaluación *in situ* del proceso (Miri et al., 2022).

Esta monografía revisa y consolida los hongos y bacterias con capacidades potenciales para la biotransformación de residuos de polietilenteraftalato, polietileno y cloruro de polivinilo. Para comprender dicho potencial, es preciso reconocer los procesos biotecnológicos existentes para la biotransformación de plásticos como el polietilenteraftalato, polietileno y cloruro de polivinilo mediante acción microbiana, identificar los hongos y bacterias con capacidad para degradar residuos plásticos y finalmente, plantear una alternativa para la biotransformación de PET, PE y PVC mediada por hongos y bacterias.

La metodología utilizada en la presente monografía consistió en un análisis bibliométrico mediante la plataforma *The Lens* y en la construcción y visualización de redes bibliométricas con la herramienta software *VOSviewer*, de las patentes y documentos académicos relevantes relacionados con la degradación de PET, PE y PVC mediada por hongos y bacterias. El presente trabajo aporta a los cimientos documentales para el desarrollo de estrategias sostenibles en la gestión de residuos de estos materiales.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el potencial de hongos y bacterias en la biotransformación de residuos de polietilenteraftalato, polietileno y cloruro de polivinilo.

Objetivos Específicos

Reconocer los procesos biotecnológicos existentes para la biotransformación de plásticos como el polietilenteraftalato, polietileno y cloruro de polivinilo mediante acción microbiana.

Identificar los hongos y bacterias con capacidad de biodegradar residuos plásticos.

Plantear una alternativa para la biotransformación de polietilenteraftalato, polietileno y cloruro de polivinilo mediada por hongos y bacterias en una empresa floricultora en Madrid, Cundinamarca.

Transformación de PET, PE y PVC, Revisión Histórica

El polietilenteraftalato, polietileno y el cloruro de polivinilo son termoplásticos de bajo costo, de gran flujo de producción y de alta distribución en diferentes áreas industriales en la actualidad. Con el fin de identificar su proceso de biotransformación y los microorganismos involucrados, a continuación, se mencionan las características y el contexto ambiental de los polímeros mencionados.

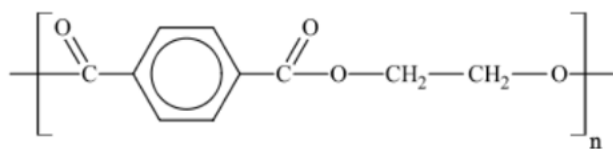
Definición y Características de PET, PE y PVC

Definición y Características del PET

El polietilenteraftalato (PET) o también llamado teraftalato de polietileno, es un polímero resultante de la reacción de policondensación del ácido teraftalático y etilenglicol. Este compuesto sintético hace parte de los poliésteres; el PET es un termoplástico lineal con un elevado grado de cristalinidad, puede ser procesado por medio de extrusión, inyección, soplado o termoconformado. En resumen, este material cuenta con una gran ventaja de maleabilidad (Carballo et al., 2023).

Figura 1

Estructura Química del PET



Nota. Tomado de. Carballo et al., 2023

En la Figura 1, se muestra la molécula base de este polímero.

Un polímero se comprende como la repetición de la misma molécula en una larga cadena de compuestos orgánicos, el PET es considerado un poliéster debido a que, en el carbono

anterior y posterior al benceno de la cadena del termoplástico, se localizan la estructura de los ésteres. El polietilenteraftalato se caracteriza por su alta resistencia al desgaste, tiene una gran resistencia al dióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂) y la humedad; aunque es un plástico que se puede reciclar, con su uso, tiende a disminuir su viscosidad a través de su transformación mediante procesos térmicos (Carballo et al., 2023).

A continuación, se mencionan las propiedades fisicoquímicas del polietilenteraftalato:

Densidad: 1,36 g/cm³ (según la normatividad ISO 1183)

Temperatura a la que desempeña un servicio óptimo: -40 a +110 °C

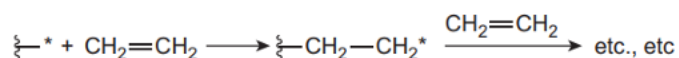
Punto de fusión: aproximadamente a 255°C (EPDA, 2011)

Definición y Características del PE

El polietileno, o por sus siglas en inglés *PolyEthilene*, es uno de los polímeros más simples, pero debido a su alta recepción de hidratos de carbono, es un material con alto tonelaje. Este material se caracteriza por ser un excelente aislante eléctrico, muy buena resistencia química (a ácidos fuertes (pH 1-3), ácidos débiles, alcoholes, sustancias alcalinas fuertes (pH 11-14) y soluciones salinas inorgánicas). Al igual que el PET, es bastante maleable, cuenta con una gran tenacidad, flexibilidad y la formación de películas de este material, en ciertos casos puede proporcionar transparencia (Ronca, 2017). El polietileno es un termoplástico y se puede encontrar de alta densidad o baja densidad, esto dependerá de la cantidad de unidades de etileno ramificadas en cadena, la reacción de polimerización de etileno se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Polimerización del Etileno



Nota. Polimerización del etileno: obtención de polipropileno. Tomado de Ronca, 2017

Las propiedades fisicoquímicas del PE de alta densidad son:

Densidad: 0,96 g/cm³ (según la normatividad ISO 1183)

Maquinabilidad: 3 en un rango de 1 a 10 en donde 1 es fácil de maquilar.

Temperatura máxima de servicio: 82°C en sistemas con flujo continuo de aire.

Punto de fusión: 127°C (según normatividad ASTM D3418) (Corporación Emacin & Duraflon, 2012).

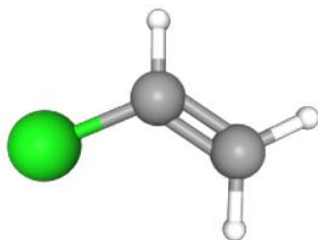
Así mismo, el polietileno no es resistente a hidrocarburos alifáticos, cetonas, ésteres e hidrocarburos aromáticos en cuanto a sustancias químicas, también se encuentran limitaciones a su resistencia a la exposición de luz solar constante y agua a elevadas temperaturas (Corporación Emacin & Duraflon, 2012).

Definición y Características del PVC

El cloruro de polivinilo (PVC) tiene como sinónimos el cloro polieteno, cloro de polietileno es una sustancia inflamable y de peligro para la salud, este polímero termoplástico en la industria se clasifica como flexible y no flexible (National Center for Biotechnology Information, 2023). El monómero de este plástico se muestra a continuación en la Figura 3, en esta molécula se identifica con el color verde el átomo de cloro, de color gris los átomos de carbono y de color blanco los de hidrógeno; en la reacción de polimerización del cloruro de etileno, la ramificación de estas moléculas sustituye el hidrógeno del carbono 1 y uno de los hidrógenos del carbono 2.

Figura 3

Estructura Molecular 3D del Monómero Cloruro de Etilo



Nota. Tomado de National Center for Biotechnology Information, 2023

Las características fisicoquímicas del cloruro de vinilo son:

Densidad: 1,43 g/cm³

Temperatura mínima de servicio: -20°C

Temperatura máxima de servicio: 50 a 75°C

Punto de fusión: 175°C (EMAC, 2012)

El cloruro de polivinilo es un material dúctil, con una elevada resistencia a sustancias químicas, tenaz y versátil, tiene una gran estabilidad dimensional ya que no absorbe agua; también se define como un polímero de gran valor reciclable. Sin embargo, este material presenta una baja resistencia al ácido crómico, ácido sulfúrico o disolventes orgánicos como acetato de etilo, acetona y tolueno (EMAC, 2012).

Historia y Usos de PET, PET y PVC

La producción de plástico tiene sus inicios en la segunda mitad del siglo XIX con la parkesina, a través de los años debido a las necesidades generadas por el ser humano y el uso de cada plástico generado, ha ido en gran aumento su producción (Melchor-Martínez et al., 2022).

Con fin de estudiar los procesos de biotransformación de los plásticos mediada por microorganismos, esta información se centrará en los termoplásticos PET, PET y PVC.

A continuación, se mencionarán los usos que se les da actualmente e históricamente al polietilenteraftalato, polietileno de alta densidad y cloruro de polivinilo con el fin de conocer los posibles sectores en donde se centraliza la comercialización, acumulación y utilidad de estos materiales.

Historia y Uso del PET

El polietilenteraftalato es un poliéster aromático, manufacturado por primera vez en la década de 1940 por Dupont. Para los años 70s, el PET empezó a utilizarse como fibra para diferentes materiales textiles e industriales. Sin embargo, su uso a través de los años fue extendiéndose a diferentes sectores (Metzger, 1976). El consumo de PET aumentó en India desde el año 2017 debido al crecimiento poblacional, la producción mayoritaria de este termoplástico se destina a fibras sintéticas (60%) y a botellas plásticas (40%) desde entonces (Dhaka et al., 2022).

El PET es el tercer termoplástico más comercializado en la industria del embalaje y la fabricación de botellas plásticas está monopolizado por este material debido a su bajo costo de producción. El polietilenteraftalato es un derivado de fuentes fósiles no biodegradable en el medio ambiente aún; actualmente, se está investigando la posibilidad de fabricación de este poliéster a partir de biomasa o la biodegradación de este material mediante procesos enzimáticos de bacterias modificadas o aisladas (Nisticò, 2020).

Hoy en día, el polietilenteraftalato es utilizado para la fabricación de prendas de vestir, en el embalaje de alimentos y bebidas, y el embalaje industrial en diferentes sectores productivos. Su uso es tan extensivo actualmente, que aqueja una preocupación debido a su contaminación y

toxicidad causada por la acumulación de este material en rellenos sanitarios y hábitats, y la toxicidad generada por su degradación, esto será descrito más adelante en su contexto ambiental.

Historia y Uso del PE

El polietileno es el plástico de mayor producción y comercialización hoy en día a nivel mundial (Patel, 2016). La evolución del polietileno a nivel molecular, se investigó en función a la temperatura durante su proceso de producción. A través de esta evolución, se determinó la clasificación de este polímero: polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de densidad media (MDPE), y polietileno de alta densidad (HDPE). El PE es un termoplástico derivado del petróleo de uso diario, pues este lo podemos encontrar como envolturas de comida, botellas de productos de aseo personal como champú y hasta en chalecos antibalas (Grover et al., 2015).

La historia del polietileno comienza con el descubrimiento accidental del polietileno de baja densidad (LDPE) por Imperial Chemistry Company en 1933. Para el año 1953, Hogan y Banks sintetizan el polietileno de alta densidad mediante un catalizador de óxido de cromo soportado por sílice/alúmina a presiones relativamente normales (presiones iguales o aproximadas a 101325 Pa-1 atmósfera) (Patel, 2016).

La aplicación del polietileno de alta densidad es sugerida para elaboración de prótesis, tanques y recipientes, tuberías, almacenamiento de agua e industria alimentaria (Corporación Emacin & Duraflon, 2012).

Historia y Uso del PVC

La producción piloto del cloruro de polivinilo inicia en el año 1931 en Alemania, en sus inicios, el PVC generó un gran interés en la industria ya que este polímero poseía propiedades muy similares al caucho o al cuero cuando se encontraba sometido a altas temperaturas. La producción de cloruro de polivinilo desde sus inicios se realiza en Alemania, Estados Unidos y

Reino Unido (Patrick, 2005). El PVC es uno de los materiales con más modificaciones en su producción debido a su impacto a la salud y al medio ambiente; fue hasta el año 1950 cuando la producción de este termoplástico tuvo un crecimiento productivo y comercial del 15% anual con respecto a años anteriores (Mulder & Knot, 2001).

El PVC ha logrado reemplazar otros materiales en diferentes sectores debido a su preciso, accesibilidad y sus ventajas técnicas (Mulder & Knot, 2001). El PVC es utilizado en productos médicos (instrumentación), embalaje de alimentos, piezas tecnológicas, construcción, entretenimiento (juguetes), tejidos, protectores de productos electrónicos, entre otros (EMAC, 2012). Hasta el año 2021, el consumo per cápita de este material fue de 24kg al año (Díaz Suárez & Romero Lasprilla, 2021).

Contexto Ambiental del PET, PE y PVC

El uso de plásticos en la vida de cada ser humano tiene un flujo continuo día a día, es posible afirmar la dependencia a estos materiales en la cotidianidad. Su disposición final incorrecta, acumulación y contaminación de ecosistemas (acuáticos y terrestres), representa un grave impacto tanto a los factores bióticos y abióticos del medio ambiente, aumentando la huella de carbono, como al calentamiento global a partir de su lenta degradación, emitiendo gases de efecto invernadero (Singh Jadaun et al., 2022). En este apartado, se describirán los contextos ambientales de PET, PE y PVC.

Contexto Ambiental del PET

Los residuos sólidos urbanos más comunes son productos PET con los que fueron elaboradas botellas de agua potable, empaques de bebidas y envolturas de alimentos. Los principales países con demanda de PET son de la región de Asia del Pacífico, India, China,

Australia y Corea del Sur. Solo el 42% de las botellas plásticas son recicladas, el resto de ellas terminan en el vertedero o son incineradas (Dhaka et al., 2022).

Colombia produjo en promedio hasta el año 2021, 12 millones de toneladas de basura al año de las cuales el 10,78% es plástico (1,2 millones aproximadamente). El 56% de los residuos plásticos son envases de PET sin recurrir a procesos de economía circular en el país hasta el año 2018 (Zapata Bravo et al., 2021). El 70% de los residuos terminan siendo arrojados a los vertederos y el 50% de los residuos plásticos que llegan a los vertederos son incinerados (Vahos Padilla & Suárez Virviescas, 2022).

Las fuentes de agua son contaminadas con polientilenteraftalato o por sus productos lixiviados, la desintegración de este termoplástico a partir de su migración desde el consumidor hasta su disposición final, puede resultar en microplásticos que terminan en diferentes ecosistemas. Existen algunos estudios en donde se analizó el agua embotellada en PET, en este sistema se encontraron microplásticos debido a la interacción del fluido y el polímero (Dhaka et al., 2022; Greifenstein et al., 2013). Uno de estos estudios se desarrolló en Tailandia en donde se encontró una concentración de microplásticos de 140 ± 19 partículas/L de agua embotellada en envase de plástico (Kankanige & Babel, 2020), un segundo estudio determinó que por la acción de abrir y cerrar las botellas de agua elaboradas con PET comprende una concentración de 553 ± 202 microplásticos/L/ciclo de uso (Singh, 2021). Finalmente, un análisis expone que la detección de microplásticos en las botellas PET son producidos por el moldeo por inyección de dichas botellas y la fricción de las tapas de estos recipientes con estos al abrir y cerrar la botella (Polychronopoulos & Vlachopoulos, 2023).

Uno de los plásticos con mayor interés para su reciclaje es el PET debido a su uso extensivo. Sin embargo, debido a costos, logística y hasta el desarrollo cultural de la disposición

de residuos, han generado la acumulación de este material. Las alternativas para la producción de biopolímeros provenientes del PET en su etapa de posconsumo son: polihidroxialcanoato (PHA) y poliamida uretano (bio-PU) (Tiso et al., 2021). Una segunda alternativa para evitar la acumulación de los residuos de este material es el reciclaje; sin embargo, el porcentaje de reciclaje sigue siendo bastante bajo frente a las repercusiones ambientales. Por esto mismo, se ha planteado una tercera alternativa biotecnológica, la biotransformación de este termoplástico en condiciones normales mediada por microorganismos (Danso, Schmeisser, Chow, Zimmerman, Wei, Leggewie, et al., 2018).

Contexto Ambiental del PE

En el 2020, se produjeron cerca de 400 millones de toneladas de plástico en el mundo, la producción de polietileno fue de 104,4 millones de toneladas para este año (Tennakoon et al., 2020). A pesar de que el polietileno brinda a la población comodidad, amenaza la sostenibilidad ambiental y salud humana. La eficiencia de reciclaje para el PE es insuficiente, cada año se acumulan millones de toneladas en ambientes acuáticos y terrestres. Este termoplástico es químicamente estable y no biodegradable, los métodos tradicionales para su eliminación son la incineración y en vertederos (aproximadamente el 79% de los residuos), estos métodos suelen ser costosos, insostenibles e incrementan el impacto ambiental debido a sus emisiones de gases de efecto invernadero y a la generación de microplásticos (Yao et al., 2022).

El polietileno de alta densidad (HDPE), desprende aproximadamente 0,40 toneladas de CO₂ en su ciclo de vida. Uno de los métodos tradicionales para la degradación de este tipo de polietileno es la pirólisis. Sin embargo, también resulta costoso y tiene repercusiones ambientales (Xiang & You, 2020).

El PE cuenta con un porcentaje bajo de reciclaje (aproximadamente del 20% a nivel mundial), debido a sus propiedades y los productos que son fabricados con este termoplástico, las envolturas de alimentos de un solo uso, los envases de productos de aseo o productos químicos, hacen que su reciclaje sea complejo; por lo general, el lixiviado del residuo plástico afecta la población de microorganismos del suelo y su actividad; estos polímeros fluyen hacia los océanos donde causan efectos tóxicos sobre la vida marina por consumo y asfixia. Además, su degradación afecta ecosistemas terrestres y acuáticos. Ante el incremento de la problemática mundial por los desechos de polietileno y las limitaciones de métodos tradicionales como el transporte de estos a vertederos o su incineración, actualmente se tiene en consideración la transformación biológica para despolimerizar estos desechos o convertirlos en productos aprovechables (Yao et al., 2022).

Contexto Ambiental del PVC

El PVC en el año 2020, representó el 10% de la demanda de plástico a nivel mundial, es utilizado ampliamente en la elaboración de muebles, tuberías y suministros médicos principalmente debido a su bajo costo y resistencia (Xiang & You, 2020).

Hoy en día, la incineración junto a otros residuos urbanos es el método más utilizado para la eliminación de cloruro de vinilo. Sin embargo, el PVC cuenta con un alto porcentaje de Cl en su estructura (56,80%), que aporta el 80% de Cl orgánico y 50% del Cl total en los residuos sólidos urbanos (RSU) (Xiang & You, 2020). El reciclaje mecánico de PVC también enfrenta dificultades debido a su baja estabilidad térmica, su alto contenido de plastificantes y las repercusiones ambientales (cloración de ecosistemas, evaporación de metales pesados, formación de dioxinas, entre otras). Actualmente se plantean alternativas como la pirólisis catalítica,

pirólisis bajo presión autógena, despolimerización por agua supercrítica y tratamiento químico con amoníaco acuoso a baja temperatura (Xiang & You, 2020).

Así como el PET y PE, la acumulación de PVC en vertederos genera un impacto negativo en ecosistemas terrestres y acuáticos, a pesar de tener un porcentaje aproximado de 27,3% de reciclaje, este material sufre una degradación parcial por agrietamiento y fractura principalmente produciendo pequeñas piezas llamadas microplásticos (Zhou et al., 2022). Existe una amplia posibilidad de biotransformación del PVC a partir de diferentes cepas microbianas que incluyen hongos y bacterias, lo que representa una alternativa sostenible para enfrentar esta problemática.

Procesos Convencionales de Gestión de Residuos de PET, PE y PVC

Hasta el año 2019, se estimaba entre 350 y 400 millones de toneladas de residuos plásticos por año a nivel mundial, residuos que se acumulan en ambientes terrestres y marinos debido al reciclaje incorrecto y al escaso uso circular de estos materiales (Danso et al., 2019). Los procesos convencionales de gestión de residuos plásticos se implementan como métodos para mitigar su acumulación y el impacto que tienen en el medio ambiente, en la salud humana y en la preservación de diferentes hábitats.

Gestión De Residuos Plásticos en Vertederos

Con el aumento acelerado de la producción y uso de plásticos a nivel mundial en diferentes sectores como la agricultura, medicina, transporte, comunicaciones, entre otras, se implementan diferentes estrategias para disminuir el uso de los plásticos de un solo uso y mitigar su impacto ambiental. Algunas estrategias se centran en reducir el consumo de plásticos mediante su prohibición o regulación a través de políticas; otras estrategias se centran en la recuperación de plásticos, con lo que se requiere la recolección de residuos y su clasificación (reciclaje) en lugares de acopio llamados vertederos. Sin embargo, la implementación de técnicas de reciclaje y la

recuperación de materiales plásticos a nivel industrial es limitada por falta de recursos técnicos y/o económicos, principalmente en países en desarrollo (Quecholac-Piña et al., 2021).

La gestión de residuos plásticos en vertederos enfrenta una significativa acumulación de estos materiales sumado a un esquema limitado debido a la capacidad instalada en la que se disponen los residuos, que busca la mitigación del impacto ambiental generado por los plásticos; desde los vertederos, los residuos plásticos llegan a diferentes hábitats por acción de vectores (humano, biológico o ambiental), generando un impacto al suelo, al agua y al aire (Yadav et al., 2020).

El polietileno de alta densidad y el cloruro de polivinilo son los plásticos con mayor resistencia a la degradación debido a su porosidad y densidad; situación que agudiza su acumulación en el medio ambiente (Quecholac-Piña et al., 2021).

Los vertederos, además de almacenar una gran cantidad de residuos plásticos, son uno de los principales generadores de microplásticos. Los microplásticos resultan de los lixiviados producidos durante la degradación de plásticos acumulados bajo condiciones ambientales como la temperatura o deterioro causado por la luz solar, lo que afecta a diversidad de especies de animales y plantas, la salud del ser humano y las comunidades de microorganismos de diferentes hábitats (Yu et al., 2022).

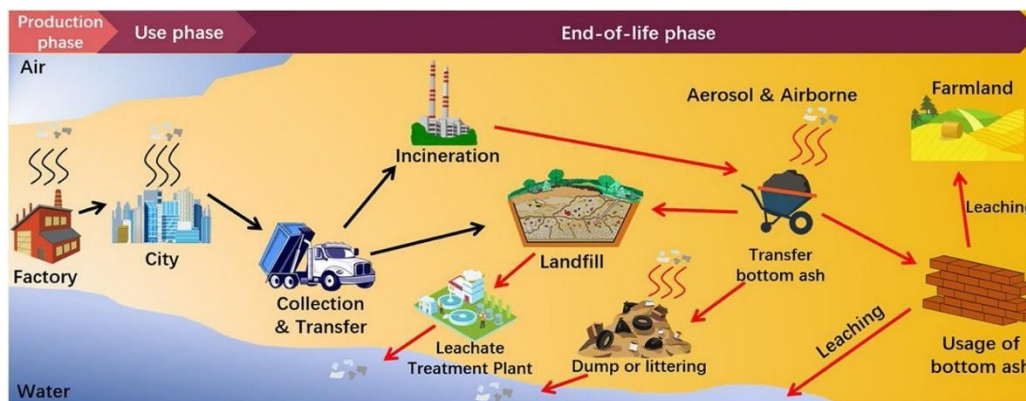
El vertedero, con la subsecuente liberación de microplásticos al medio ambiente y su impacto en diversos hábitats, es responsable además de importantes emisiones de metano en la atmósfera. Esto ha generado urgencia para movilizar la reurbanización de estos sitios y la implementación de sistemas de economía circular para mitigar la problemática ambiental. Para abordar los residuos plásticos que comprenden la mayoría de residuos en estos lugares (aproximadamente un 90%), se ha planteado la producción de combustible o petroquímicos

básicos; también se han establecido procesos de transformación en pellets como estrategia de reciclaje de algunos de los materiales plásticos encontrados en los vertederos (Yu et al., 2022). Los pellets son productos de diferentes plásticos comerciales en forma de gránulos de tamaño aproximado de 5mm, los residuos plásticos más utilizados para la generación de pellets son el PVC, PE de alta densidad y PP (Sánchez Gallo, 2015).

Incineración de Residuos Plásticos

La incineración es el proceso más utilizado en el mundo en la gestión de residuos plásticos y urbanos, como residuos médicos o peligrosos; a partir de este proceso convencional de manera controlada, existe un control ambiental parcial frente a la eliminación del éter decabromodifenilo presente en termoplásticos provocado por las cenizas generadas en su degradación térmica debido que ésta se implementa en hornos en el que se recolecta esta ceniza y no es expuesta al medio ambiente (Cudjoe & Wang, 2022).

La incineración de residuos plásticos se consideró una de las soluciones más efectivas para la eliminación de los mismos, evitando la generación de microplásticos producidos en los vertederos. Este proceso convencional tuvo gran aceptación debido a que los residuos plásticos así gestionados, eran eliminados permanentemente. La Figura 4 muestra que el proceso de incineración mitiga la acumulación de plásticos en los vertederos y además permite generar nuevos productos a partir de su combustión. Sin embargo, en el proceso de incineración se forman cenizas, que son finalmente devueltas al vertedero (Yang et al., 2021).

Figura 4*Proceso Convencional de Gestión de Residuos Plásticos: Incineración*

Nota. Tomado de Yang et al., 2021.

Los procesos térmicos para la gestión de residuos plásticos como la incineración, además de minimizar la acumulación de estos materiales en los vertederos, también se implementan con el propósito de reducir la huella de carbono, aumentar la eficiencia de la conversión del plástico y llevar a cabo procesos más rentables. La incineración de residuos plásticos está relacionada con la recuperación energética. A pesar de generar como producto principal un potencial energético para la generación de electricidad, también existe un debate debido a su viabilidad económica y ambiental (Cudjoe & Wang, 2022); el tratamiento térmico generado al PVC genera emisiones de compuestos clorados a la atmósfera los cuales son altamente perjudiciales para el ser humano (Xiang & You, 2020), su viabilidad económica es baja, el proceso de instalación supone elevados costos para países en vías de desarrollo a pesar de presentar un gran rendimiento energético. Hasta el año 2022, se reportó que tan solo el 12% de los residuos plásticos reciclados fueron incinerados (Cudjoe & Wang, 2022).

Finalmente, los residuos generados también son transportados por diferentes transmisores de contaminación a fuentes hídricas, suelo y aire como se muestra en la Figura 4.

Con la finalidad de implementar una economía circular, países líderes como China, han implementado un impuesto para la gestión convencional de residuos plásticos, como los vertederos y la incineración, como estrategia para reducir la acumulación de plásticos o microplásticos en diferentes hábitats (De Weerd et al., 2020).

Pirólisis Catalítica

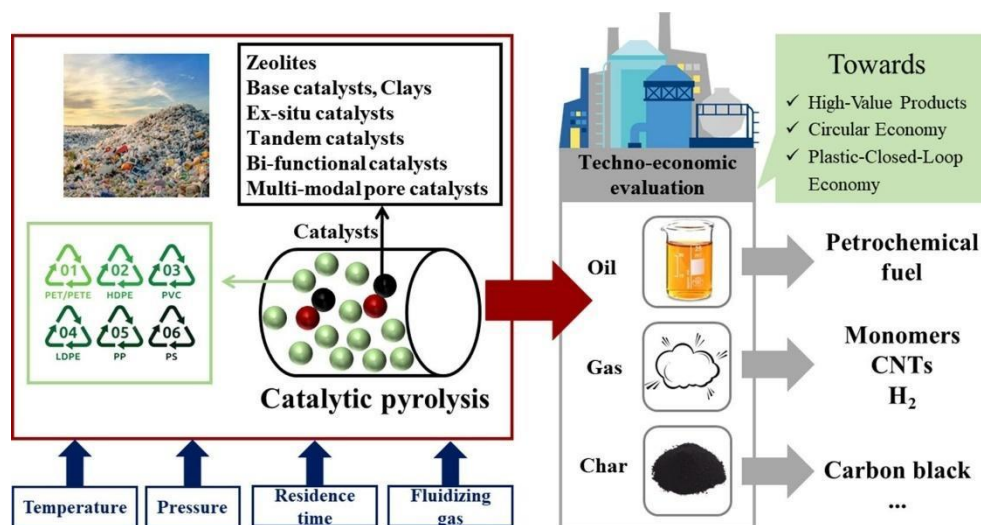
La pirólisis catalítica se ha convertido en uno de los procesos más prometedores para la transformación de residuos plásticos en productos de alto valor, como los combustibles. Debido a la búsqueda de la neutralidad de carbono a nivel mundial, este proceso realiza una optimización energética. La pirólisis se ha considerado un método de reciclaje químico, se trata de un proceso inverso a la fabricación de plástico a partir del petróleo. Este inicia al comprimir los residuos plásticos, posteriormente hay un precalentamiento del material antes de ingresar al reactor; la tercera etapa ocurre mediante acción de los catalizadores en el reactor, finalmente se obtendrá un carburante (Peng et al., 2022).

La pirólisis tiene una importante mejora en la recuperación de energía generada en la incineración, en el proceso térmico de la incineración de residuos plásticos se liberan sustancias tóxicas como las dioxinas. A partir de la pirólisis se puede obtener principalmente fuentes de energía en estado líquido, gaseoso y carbón, además de productos químicos. La degradación de residuos plásticos como el polietilenterftalato, polietileno de alta densidad y baja densidad, cloruro de polivinilo, poliestireno y polipropileno se realiza en un reactor a una temperatura entre 380 y 450°C durante 40 minutos, bajo una atmósfera inerte (Biakhmetov et al., 2023). Como se muestra en la Figura 5, el catalizador base para la implementación de este método son las zeolitas microporosas/mesoporosas y otros catalizadores de arcilla. Para los procesos de craqueo

térmico son utilizados los catalizadores *ex situ*, catalizadores en tándem y catalizadores bifuncionales, fundamentales para la producción de combustible (Peng et al., 2022).

Figura 5

Pirólisis Catalítica de Residuos Plásticos



Nota. Tomado de Peng et al., 2022

A pesar de que se obtienen combustibles líquidos de alta calidad, se requiere una optimización del producto final en los procesos posteriores de filtración, hidrogenación, destilación, extracción líquido-líquido o en la mezcla de combustibles convencionales para su comercialización. El gas no condensable generado también es un producto que requiere de procesos adicionales para ser precursor de alto valor en la producción de materias primas (*commodities*) como etileno y propileno (Peng et al., 2022).

Existen procesos de biotransformación y biodegradación de los residuos plásticos mediados por microorganismos como bacterias y hongos, que han tenido gran impacto debido a la influencia de la economía circular en la ecología de la plásticosfera. En el próximo capítulo se

mencionan los mecanismos de acción sobre estos materiales y los registros de patentes vigentes relacionados.

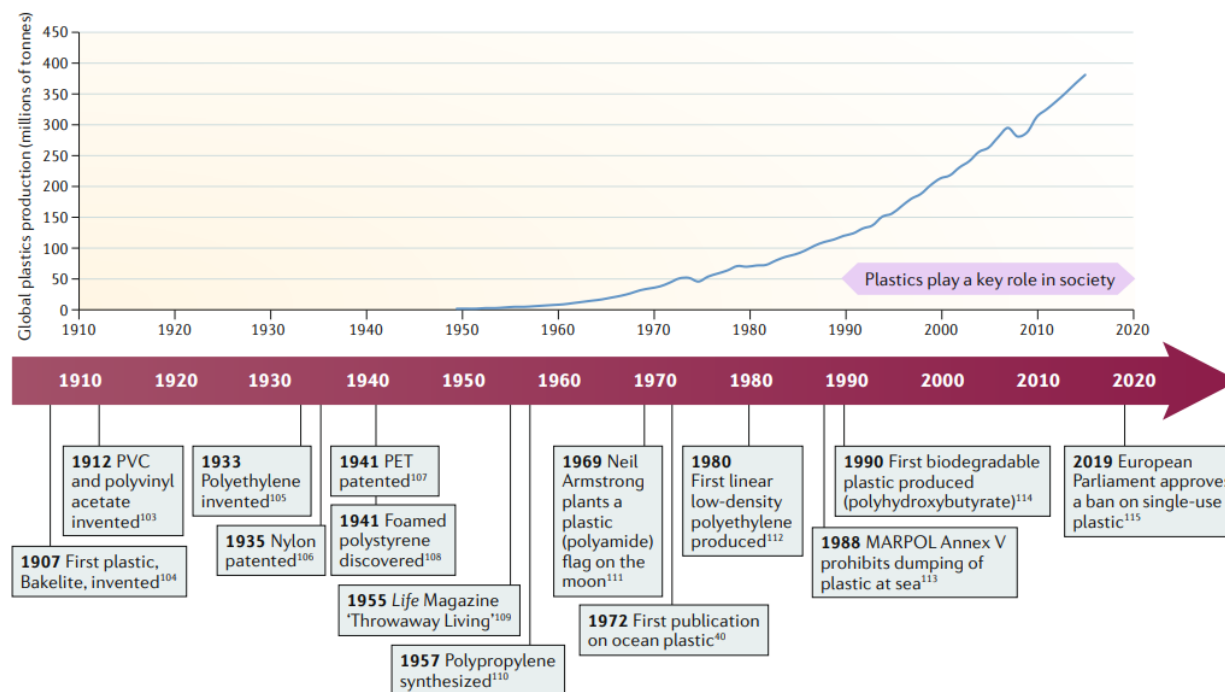
Biotransformación de PET, PE y PVC Mediada por Hongos y Bacterias

Biodegradación y Biotransformación

Desde 1907, año en que se inventó el primer plástico y hasta la actualidad, la tendencia en el uso de plásticos ha ido en aumento, tal como se infiere en la Figura 6. A partir de la década de los años setenta, hubo un aumento significativo en el uso de este material en la vida cotidiana y con ello, los primeros desechos plásticos en los océanos detectados. Desde la década de los noventa hasta la actualidad, el plástico se convirtió en el material más utilizado en casi todas las actividades industriales, comerciales y domésticas para el ser humano, el embalaje de alimentos, implementos médicos, de construcción, tecnología y demás sectores, se utilizan los plásticos reemplazando a otros materiales como el vidrio, cartón o metales (Amaral-Zettler et al., 2020).

Figura 6

Línea del Tiempo del Origen y Contexto del Plástico hasta el Año 2019



Nota. Tomado de Amaral-Zettler et al., 2020

Como es sabido desde hace décadas, diversos sectores han implementado múltiples estrategias para mitigar la acumulación de desechos plásticos que afectan los ecosistemas y entre ellas, la utilización de los métodos convencionales de disposición final de plástico como los vertederos, la incineración de residuos y la pirólisis catalítica. No obstante, para el año 2020, la producción de plástico a nivel mundial estuvo cerca de 400 toneladas (Figura 6), un dato desbordado que se suma a un nuevo concepto para los ecosistemas de planeta Tierra que relaciona la interacción de los diversos hábitats con plásticos sintéticos como el PET, PE y PVC: la plastisfera, término acuñado desde el año 2013 (Barros & Seena, 2021).

Los microplásticos están presentes en el suelo, en hábitats marinos o de agua dulce y en el aire. Los microorganismos que colonizan y habitan los desechos plásticos o derivados de estos, como los microplásticos, son conocidos como plastisfera. La comprensión de la ecología de la plastisfera puede brindar una estrategia biotecnológica mediada por microorganismos para combatir las afectaciones al medio ambiente causadas por estos residuos. En la actualidad no se ha determinado si existe una plastisfera central, es decir, microorganismos cuya única fuente de carbono sea el plástico y por lo que, de forma obligada utilicen vías metabólicas de biodegradación o biotransformación de plásticos (Amaral-Zettler et al., 2020).

Recientemente, las investigaciones se han interesado en la plastisfera como una posible solución a la contaminación plástica en medios marinos, de agua dulce o suelo a través de la biodegradación de residuos plásticos mediada por microorganismos. La biodegradación comprende la descomposición completa del plástico en dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y biomasa en entornos aeróbicos y; CO_2 , metano (CH_4) y biomasa en entornos anaeróbicos en un periodo de tiempo razonable: >90% de carbono convertido en CO_2 en 180 días en instalaciones

de compostaje industrial y al menos el 30% de carbono convertido en CO₂ en 180 días a 30°C aproximadamente en ambientes marinos (Amaral-Zettler et al., 2020).

El polietilenteraftalato, polietileno y cloruro de polivinilo representan cerca del 90% de producción y comercialización de plásticos a nivel mundial (Rosato et al., 2020). Una de las medidas para la disminución de estos materiales acumulados en diferentes ecosistemas ha sido su biotransformación mediante la colonización de microorganismos aislados. En los años 70, se analizó por primera vez la colonización natural de microorganismos en fragmentos de plásticos en ecosistemas acuáticos (Rosato et al., 2020).

También se ha demostrado que los microplásticos son fácilmente colonizados por comunidades microbianas en pocas horas o días de incubación en agua de mar y sedimentos marinos costeros. En ecosistemas de agua dulce y terrestres, también se encuentran degradadores de estos termoplásticos¹, sin embargo, estos cambian significativamente en composición y clasificación taxonómica. Las comunidades microbianas relacionadas con la biotransformación de microplásticos tienen menor diversidad alfa, es decir, existe una gran diferenciación entre los microorganismos y su clasificación de especies relacionadas con el tipo de termoplástico (Rosato et al., 2020).

Para la biotransformación de PET, se ha mencionado que existen dos intereses: modificación enzimática de la superficie de fibras de poliéster y la gestión de sus residuos mediante hidrólisis enzimática (Kawai et al., 2019). Las enzimas relacionadas con la degradación del PET son las α y β hidrolasas y las cutinasas relacionadas con los filos de *Actinobacteria*, *Proteobacteria* y *Bacteroidetes* (Danso, Schmeisser, Chow, Zimmerman, Wei, Leggewei, et al., 2018). Para el caso del PE, más específicamente el HDPE (del inglés *High Density Poly*

¹ Se le denomina termoplástico a un polímero que a altas temperaturas puede fundirse, estos materiales se caracterizan por su propiedad de maleabilidad (Jones, 1997).

Ethylene), se relacionan bacterias y hongos en ecosistemas de agua dulce y terrestre que involucran reacciones con monohidroxilaciones dependientes del citocromo P450 con posterior oxidación adicional de metabolitos; algunas de las especies relacionadas con la degradación de este termoplástico son *Clavariopsis Aquatica* o *Stropharia rugosoannulata* (Carstens et al., 2020). Finalmente, para la biotransformación del PVC, se mencionan comunidades de microorganismos principalmente de ecosistemas terrestres, los biodegradadores de este material son principalmente *Penicilium sp.* y *Mucor sp.* (Pardo-Rodríguez & Zorro-Mateus, 2021)

Los residuos plásticos han estado presentes en el medio ambiente desde los años 70s, es probable que los microorganismos aún se están adaptando a colonizar y utilizar el plástico como sustrato. Aún no es preciso saber cuántas especies conviven con un microplástico o un trozo de plástico, más particularmente en el océano, donde una amplia cantidad de especies muestran dominancia (Amaral-Zettler et al., 2020).

Biodegradación y Biotransformación de Plásticos Mediada por Microorganismos.

A nivel industrial se denomina biotransformación a la utilización del metabolismo microbiano como acción modificadora sobre un material. Así las cosas, los términos biodegradación y biotransformación pueden superponerse según sea el campo de interés (Parales et al., 2002). Para el caso de los termoplásticos analizados en este documento, nos centraremos en la biodegradación y biotransformación de PET, PE y PVC mediada por hongos y bacterias. Esta propuesta plantea una estrategia biotecnológica sostenible para la gestión de residuos acumulados en la empresa floricultora Jardines de los Andes, mediada por la biodegradación y biotransformación de estos residuos, utilizándolos como fuente de C en sus rutas metabólicas.

En la naturaleza, los seres vivos se clasifican en siete reinos: Archaea, Bacteria, Protozoa, Chromista, Fungi, Plantae y Animalia (Ruggiero et al., 2015). Los microorganismos pertenecen a

los reinos Archaea, Bacteria (organismos procariotas), y Fungi (organismos eucariotas saprófitos) (Lew, 2019).

Los microorganismos en el suelo incluyen a bacterias, arqueas y hongos con dimensiones de 20 nm a 10 μm , que viven principalmente en soluciones de sustrato con agua gravitacional, capilar e higroscópica, participan en la descomposición de materia orgánica y la meteorización del suelo. La diversidad de los microorganismos depende de las condiciones de los microhábitats y las propiedades fisicoquímicas de su entorno (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2020). Los microorganismos presentes en el aire más predominantes son las bacterias y hongos, el aire es un entorno bastante dinámico y susceptible a variación en la composición microbiana debido a eventos ambientales como tormentas de polvo, chubascos, niebla, entre otros (Naumova & Kabilov, 2022).

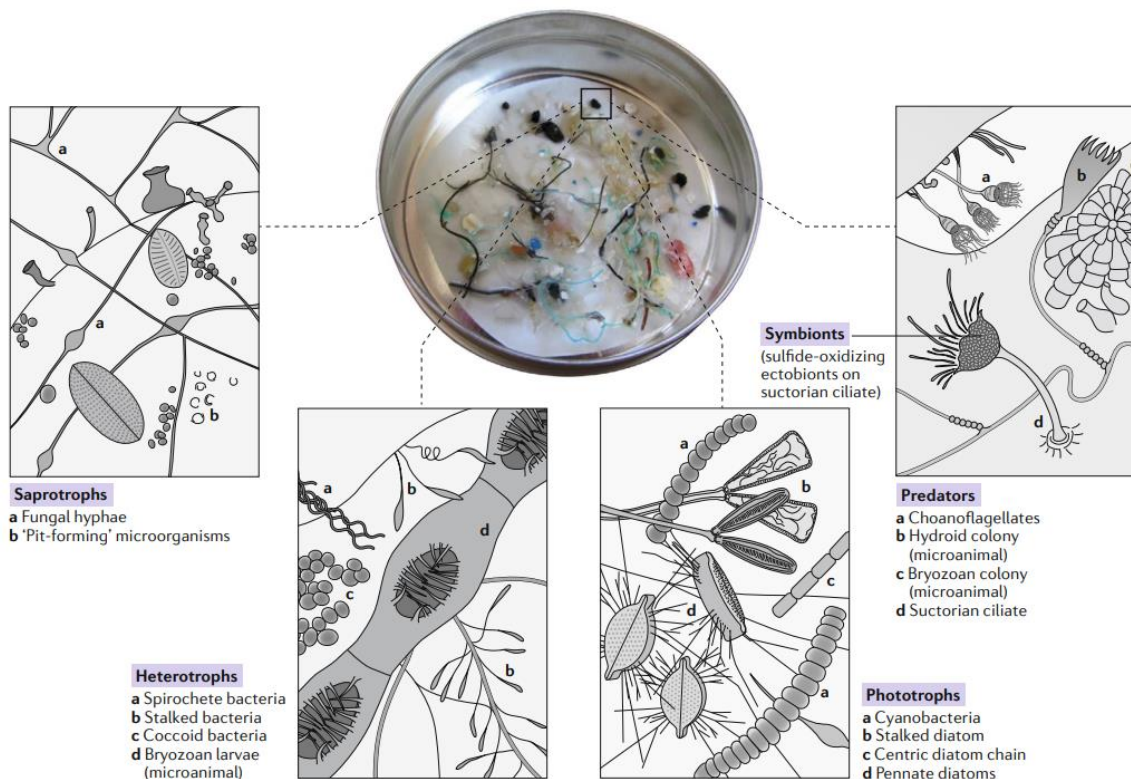
Entre los microorganismos acuáticos se encuentran bacterias, hongos, arqueas y plancton (Irfan et al., 2019), su abundancia está condicionada por factores como la química del agua (concentración de minerales), abundancia de materia orgánica, pH, concentración de oxígeno, disponibilidad de luz y movimiento del agua. El comportamiento de las comunidades microbianas en estos hábitats varía constantemente lo cual resulta en diferentes comunidades a diferentes profundidades o con distintas características de sustrato bentónico, no obstante, hay microorganismos que pueden vivir en cualquier ambiente acuático como sistemas anaeróbicos o lugares con temperaturas extremas. A medida que las comunidades microbianas varían como respuesta a condiciones ambientales cambiantes como tormentas, sustancias químicas circundantes o disponibilidad de nutrientes, afectará también al desarrollo de algas, plantas y animales (NSF, 2024).

Las primeras micrografías electrónicas de barrido a biopelículas sobre la superficie de sustratos plásticos insinuaban la existencia de biodiversidad dentro de la comunidad microbiana de la plastisfera. Se denomina biopelícula a los agregados de células adheridas a un sustrato que crecen dentro de una matriz compuesta de sustancias poliméricas extracelulares. La formación de biopelículas en diferentes superficies, constituye un cambio considerable en el estilo de vida de un microorganismo en estado móvil o también llamado estado planctónico, en el que se relaciona el conjunto de genes específicos implicados en la quimiotaxis, la comunicación, la adhesión y el transporte de sustrato y que son expresados para permitir a las células individuales formar una matriz análoga a los tejidos que ayuda a distribuir los nutrientes entre todo el conjunto de organismos celulares que conforman la biopelícula (Amaral-Zettler et al., 2020). Este proceso de colonización de microorganismos para la formación de biopelículas en su superficie, es llevada a cabo en el medio de cultivo a nivel laboratorio, o también en un sistema controlado de biorreactores.

A partir de los análisis de microscopía electrónica de barrido, se ha confirmado que la plastisfera es un microecosistema superpoblado de la superficie del océano abierto oligotrófico, es decir, con baja disponibilidad de nutrientes. Entre los principales microorganismos que conviven en estos hábitats se encuentran saprófitos, heterótrofos, fotótrofos, depredadores y simbioses como muestra la Figura 7 (Amaral-Zettler et al., 2020).

Figura 7

Tipos de Microorganismos Presentes en la Plastisfera



Nota. Tomado de Amaral-Zettler et al., 2020

Los microorganismos fotótrofos más comunes y omnipresentes en la plastisfera son las diatomeas, más específicamente en los plásticos expuestos a la luz solar. No es clara la aparición de los fotótrofos en la colonización de la superficie de los plásticos, estos se reportan como colonizadores primarios y en algunas declaraciones, dominantes en los desechos plásticos (Kettner et al., 2019). Las diatomeas identificadas gracias a su morfología son *Mastogloia pusilla*, *Mastoglia hulburti*, *Cyclotella meneghiniana* y *Pleurosigma sp.*, y los géneros *Sellaphora*, *Amphora* y *Nitzschia* encontrados en el Golfo Árabe y el Mar de los Sargazos en mayor abundancia (Muthukrishnan et al., 2019).

Junto a las diatomeas, las cianobacterias representan los microorganismos fotótrofos de la plastisfera, de cuyos géneros filamentosos *Phormidium*, *Rivularia* y *Leptolyngbya*, se reportan principalmente en la superficie de microplásticos de cuencas oceánicas (Amaral-Zettler et al., 2020). Las estrategias de adaptación para la captación de luz que poseen estas especies filamentosas de cianobacterias, les ayudan a superar desafíos de alta y baja iluminación en ambientes oligotróficos del océano abierto. *Microcystis* son cianobacterias pertenecientes al ecosistema de la plastisfera que constituye el 4% de la comunidad bacteriana degradadora de botellas de polietilenteraftalato (PET) en aguas marinas (Muthukrishnan et al., 2019).

Además de los fotótrofos, los residentes comunes de la plastisfera en partes del océano iluminadas por el sol incluyen a las bacterias fotoheterotróficas, dentro de las que se destacan los géneros *Erythrobacter* y *Roseobacter*; algunos miembros de estos géneros poseen genes relacionados con la fotoheterotrofia anaeróbica, contienen bacterioclorofila (Haiwei & Ann, 2014). Los microorganismos fotótrofos tradicionales pueden utilizar sustratos orgánicos de forma heterótrofa (Amaral-Zettler et al., 2020).

A pesar de las diferencias de taxones dominantes que habitan la plastisfera en ambientes frescos en comparación con ambientes marinos, el ciliado adherido *Ephelota* es común en microplásticos de muestras marinas y de agua dulce, por lo que es considerado como un depredador con alta capacidad para sobrevivir a distancias lejanas de la costa entre los microorganismos pertenecientes al reino Protozoa; en Japón se menciona la prevalencia de este género en plástico asociado a la maricultura de algas (Amaral-Zettler et al., 2020).

Los esfuerzos por cultivar bacterias con plástico (PP o PET) como única fuente de energía han permitido aislar varias cepas como, por ejemplo, *Pseudomonas spp.*, *Azotobacter*

spp. (gammaproteobacterias), *Bacillus spp.* (firmicutes), y *Rhodococcus spp.* (actinobacterias) (Amaral-Zettler et al., 2020).

Con relación a los hongos, se han registrado secuencias genéticas en estudios dirigidos a eucariotas detectados en la superficie de desechos plásticos; las funciones tróficas de los hongos saprótrofos en la plastisfera incluyen descomposición, parasitismo, depredación, simbiosis y patogénesis. La diversidad de hongos de la plastisfera ha sido poco explorada, entre los filos identificados se encuentran *Chytridiomycota*, *Cryptomycota* y *Ascomycota* registrados en sustratos de PE y PS en aguas dulces y salobres. Los hongos en la plastisfera constituyen el 4% del total de eucariotas (Amaral-Zettler et al., 2020; Kettner et al., 2019).

Las investigaciones y patentes relacionadas con la biodegradación y biotransformación de plásticos como PET, PE y PVC, muestran que los hongos y bacterias del ecosistema de la plastisfera, pueden desempeñar una estrategia sostenible que logre gestionar la acumulación de estos termoplásticos en su centro de acopio, y adicionalmente puede desencadenar en una oportunidad de identificación de microorganismos degradadores de plástico presentes en su entorno.

Bacterias Y Hongos: Géneros y Especies Biodegradadores de Plástico

La biodegradación y biotransformación de plásticos sintéticos se lleva a cabo por microorganismos y sus procesos enzimáticos que ofrecen la posibilidad de desarrollar tecnologías de tratamiento biológico de residuos plásticos (Ru et al., 2020). Numerosos estudios han registrado diferentes aislados de hongos y bacterias con capacidad para biodegradar PE y PVC (Giacomucci et al., 2019; Rosato et al., 2020; Saeed et al., 2022) ; de los que se destaca el trabajo realizado por Saeed, cepas de hongos y bacterias han sido aislados del suelo para generación de biopelículas en superficies plásticas de PVC y PE, y así lograr una biodegradación

exitosa, las cepas bacterianas utilizadas fueron Sb1 *Bacillus licheniformis* y Sb2 *Achromobacter xylosoans*, y las cepas de los hongos fueron Sf.1 *Aspergillus niger* y Sf.2 *Aspergillus glaucus*.

La biodegradación de estos materiales se evaluó a partir de la caracterización de pérdida de peso y despolimerización medida con espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR); en este estudio se registró un 32,2% de degradación de PE con cepas bacterianas y 40% con cepas fúngicas durante 4 semanas y para el PVC una degradación de 17 a 32% con cepas de hongos durante 4 semanas (Saeed et al., 2022).

La biodegradación de plásticos mediada por hongos ha sido poco estudiada. Sin embargo, los hongos también desempeñan importantes procesos enzimáticos en el ecosistema de la plastisfera. Se han analizado las capacidades biocatalíticas y bioabsorbentes del PET y PE de baja densidad y alta densidad a partir de procesos enzimáticos de estos microorganismos, las cepas de *Clavariopsis Aquatica*, *Stachybotrys chlorhalonata* y *Acephata sp.* han sido las especies con mejores resultados en la biodegradación de estos residuos plásticos (Carstens et al., 2020); la capacidad de descomposición biocatalítica de los aditivos plásticos que desempeña el potencial fúngico, justifica su papel como saprobionte en este ecosistema (Carstens et al., 2020)

En la Tabla 1, se mencionan las principales bacterias y hongos relacionados con la degradación de PET, PE y PVC basado en investigaciones relacionadas con esta perspectiva de estrategia biotecnológica para combatir la acumulación de residuos plásticos.

Tabla 1*Principales Géneros de Hongos y Bacterias Degradadores de Plástico*

Género	Reino	Plástico	Artículo	Autores	Año
<i>Penicillium</i>	Fungi	PVC	Biodegradation of polyvinyl chloride by <i>Mucor</i> sp. and <i>Penicillium</i> sp. isolated from soil	Pardo Rodríguez, M.L, Zorro-Mateus, P.	2021
<i>Mucor</i>	Fungi	PVC	Biodegradation of polyvinyl chloride by <i>Mucor</i> sp. and <i>Penicillium</i> sp. isolated from soil	Pardo Rodríguez, M.L, Zorro-Mateus, P.	2021
<i>Delfia</i>	Bacteria	PET	Biodegradation of diethyl terephthalate and polyethylene terephthalate by a novel identified degrader <i>Delfia</i> sp. WL-3 and its proposed metabolic pathway	Liu, J., Xu, G., Dong, W., Xu, N., Xin, F., Ma, J., Fang, Y., Zhou, J., Jiang, M.	2018
<i>Pseudomonas</i>	Bacteria	PET, PE	A landfill serves as a critical source of microplastic pollution and harbors diverse plastic biodegradation microbial species and enzymes: Study in large-scale landfills, China	Linn, X., Zhang, S., Yang, S., Zhang, R., Shi, X., Song, L.	2023

<i>Bacillus</i>	Bacteria	PE	A landfill serves as a critical source of microplastic pollution and harbors diverse plastic biodegradation microbial species and enzymes: Study in large-scale landfills, China	Linn, X., Zhang, S., Yang, S., Zhang, R., Shi, X., Song, L.	2023
<i>Paenibacillus</i>	Bacteria	PE	A landfill serves as a critical source of microplastic pollution and harbors diverse plastic biodegradation microbial species and enzymes: Study in large-scale landfills, China	Linn, X., Zhang, S., Yang, S., Zhang, R., Shi, X., Song, L.	2023
<i>Vibrio</i>	Bacteria	PVC	Bioremediation of polyvinyl chloride (PVC) films by marine bacteria	Khandare, S. D., Chaudhary, D. R., Jha, B.	2021
<i>Altermona</i>	Bacteria	PVC	Bioremediation of polyvinyl chloride (PVC) films by marine bacteria	Khandare, S. D., Chaudhary, D. R., Jha, B.	2021
<i>Cobetia</i>	Bacteria	PVC	Bioremediation of polyvinyl chloride (PVC) films by marine bacteria	Khandare, S. D., Chaudhary, D. R., Jha, B.	2021

<i>Pseudomonas</i>	Bacteria	PVC, PE	Polyvinyl chloride biodegradation by <i>Pseudomonas</i> <i>citronellolis</i> and <i>Bacillus flexus</i>	Giacomucci, L., Raddadi, N., Soccio, M., Lotti, N. y Fava, F.	2019
<i>Bacillus</i>	Bacteria	PVC. PE	Polyvinyl chloride biodegradation by <i>Pseudomonas</i> <i>citronellolis</i> and <i>Bacillus flexus</i>	Giacomucci, L., Raddadi, N., Soccio, M., Lotti, N. y Fava, F.	2019
<i>Aspergillus</i>	Fungi		Biodegradation of PLC and PVC PVC: <i>Chaetomium globosum</i> (ATCC 16021) activity	Vivi, VK, Martins- Franchetti, SM y Attili- Angelis, D.	2019
<i>Penicilium</i>	Fungi		Biodegradation of PLC and PVC PVC: <i>Chaetomium globosum</i> (ATCC 16021) activity	Vivi, VK, Martins- Franchetti, SM y Attili- Angelis, D.	2019
<i>Chaetomium</i>	Fungi		Biodegradation of PLC and PVC PVC: <i>Chaetomium globosum</i> (ATCC 16021) activity	Vivi, VK, Martins- Franchetti, SM y Attili- Angelis, D.	2019
<i>Trichoderma</i>	Fungi		Biodegradation of PLC and PVC PVC: <i>Chaetomium globosum</i> (ATCC 16021) activity	Vivi, VK, Martins- Franchetti, SM y Attili- Angelis, D.	2019
<i>Paecilomyces</i>	Fungi		Biodegradation of PLC and PVC PVC: <i>Chaetomium globosum</i> (ATCC 16021) activity	Vivi, VK, Martins- Franchetti, SM y Attili- Angelis, D.	2019

<i>Bacillus</i>	Bacteria	PVC	Biodegradation of PVCs through in-vitro identification of <i>Bacillus albus</i> and computational pathway análisis of ABH enzyme	Naveed, M., Naveed, R., Aziz, T., Azeem, A., Afzal, M., Waseem, M., Alshammari, A., Alasmari, A. F., Albekairi, T. H.	2024
<i>Ideonella</i>	Bacteria	PET	A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)	Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., Oda, K.	2016
<i>Thermobifida</i>	Bacteria	PET	Enzymatic degradation of Poly(ethylene terephthalate): Rapid Hydrolyse using a Hydrolase from <i>T. fusca</i>	Müller, R. J., Schrader, H., Profe, J., Dresler, K., Deckwer, W. D.	2005
<i>Pseudomonas</i>	Bacteria	PET	Enzymatic degradation of Poly(ethylene terephthalate): Rapid Hydrolyse using a Hydrolase from <i>T. fusca</i>	Müller, R. J., Schrader, H., Profe, J., Dresler, K., Deckwer, W. D.	2005
<i>Candida</i>	Bacteria	PET	Enzymatic degradation of Poly(ethylene terephthalate): Rapid	Müller, R. J., Schrader, H., Profe, J.,	2005

			Hydrolyse using a Hydrolase from <i>T. fusca</i>	Dresler, K., Deckwer, W. D.	
<i>Heliales</i>	Fungi	PE	Biotransformation of PET, Phthalate Plasticizers and Bisphenol A by marine-derived, Freshwater, and Terrestrial Fungi	Carstens, L., Cowan, A. R., Seitwer, B., Schlosser, D.	2020
<i>Ascocoryne</i>	Fungi	PE	Biotransformation of PET, Phthalate Plasticizers and Bisphenol A by marine-derived, Freshwater, and Terrestrial Fungi	Carstens, L., Cowan, A. R., Seitwer, B., Schlosser, D.	2020
<i>Pleosporaceae</i>	Fungi	PE	Biotransformation of PET, Phthalate Plasticizers and Bisphenol A by marine-derived, Freshwater, and Terrestrial Fungi	Carstens, L., Cowan, A. R., Seitwer, B., Schlosser, D.	2020
<i>Clavariopsis</i>	Fungi	PE	Biotransformation of PET, Phthalate Plasticizers and Bisphenol A by marine-derived, Freshwater, and Terrestrial Fungi	Carstens, L., Cowan, A. R., Seitwer, B., Schlosser, D.	2020
<i>Stachybotrys</i>	Fungi	PE	Biotransformation of PET, Phthalate Plasticizers and Bisphenol A by marine-derived, Freshwater, and Terrestrial Fungi	Carstens, L., Cowan, A. R., Seitwer, B., Schlosser, D.	2020

<i>Trichosporon</i>	Fungi	PE	Biotransformation of PET, Phthalate Plasticizers and Bisphenol A by marine-derived, Freshwater, and Terrestrial Fungi	Carstens, L., Cowan, A. R., Seitwer, B., Schlosser, D.	2020
<i>Stropharia</i>	Fungi	PE	Biotransformation of PET, Phthalate Plasticizers and Bisphenol A by marine-derived, Freshwater, and Terrestrial Fungi	Carstens, L., Cowan, A. R., Seitwer, B., Schlosser, D.	2020
<i>Saccharomonospora</i>	Bacteria	PET	New Insights into the function and global distribution of Polyethylene terephthalate (PET)- Degrading Bacteria and Enzymes in Marine and Terrestrial Metagenomes	Danso, D., Schmeisser, C., Chow, J., Zimmermann, W., Wei, R., Leggewie, C., Li, X., Hazen, T., & Streit, W. R.	2018
<i>Thermonospora</i>	Fungi	PET	New Insights into the function and global distribution of Polyethylene terephthalate (PET)- Degrading Bacteria and Enzymes in Marine and Terrestrial Metagenomes	Danso, D., Schmeisser, C., Chow, J., Zimmermann, W., Wei, R., Leggewie, C., Li, X., Hazen, T., & Streit, W. R.	2018
<i>Ideonella</i>	Bacteria	PET	New Insights into the function and global distribution of Polyethylene terephthalate (PET)-	Danso, D., Schmeisser, C., Chow, J., Zimmermann, W., Wei, R.,	2018

<i>Thermobifida</i>	Bacteria	PET	Degrading Bacteria and Enzymes in Marine and Terrestrial Metagenomes New Insights into the function and global distribution of Polyethylene terephthalate (PET)- Degrading Bacteria and Enzymes in Marine and Terrestrial Metagenomes	Leggewie, C., Li, X., Hazen, T., & Streit, W. R. Danso, D., Schmeisser, C., Chow, J., Zimmermann, W., Wei, R., Leggewie, C., Li, X., Hazen, T., & Streit, W. R.	2018
---------------------	----------	-----	---	---	------

La Tabla 1 fue organizada teniendo en cuenta los géneros de hongos y bacterias degradadores de los polímeros sintéticos de interés involucrados en estudios relacionados con el ecosistema de la plastisfera. Además de hongos y bacterias, también se mencionan arqueas como por ejemplo el género *Methanocalculus* (Danso, Schmeisser, Chow, Zimmerman, Wei, Leggewie, et al., 2018), este ecosistema se compone de la relación trófica entre diferentes tipos de microorganismos que presenta grandes oportunidades biotecnológicas para dar solución a la problemática de acumulación de plásticos en la naturaleza (Amaral-Zettler et al., 2020).

Entre las bacterias más estudiadas para la biodegradación y biotransformación de plásticos como PET, PE y PVC se destacan los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* en las investigaciones relacionadas. Sin embargo, también se mencionan géneros como *Delftia*, *Paenibacillus*, *Vibrio*, *Altermonas*, *Cobetia*, *Ideonella*, *Thermobifida*, *Candida* y *Saccharomonospora*. El campo de investigación relacionado con el potencial de biodegradación del reino Fungi es de gran interés debido a su complejidad (Saeed et al., 2022); en las investigaciones se mencionan una gran variedad de géneros degradadores, no obstante, el principal es *Penicillium*; otros estudios relacionan además los géneros *Mucor*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Trichodrema*, *Paecilomyces*, *Heliotales*, *Ascocoryne*, *Pleosporaceae*, *Clavariopsis*, *Stachybotrys*, *Trichosporon*, *Stropharia* y *Thermonospora*.

A partir de la identificación de los géneros relacionados con la biodegradación de plástico en investigaciones y patentes, se deben tener en cuenta los microorganismos presentes en el hábitat de la empresa Jardines de los Andes, para así evaluar su potencial para la degradación en este ecosistema, y derivar un proceso de biodegradación y biotransformación de residuos plásticos. Algunos de los géneros a tener en cuenta dentro de este ecosistema son *Delftia*, *Trichodrema*, *Ideonella*, *Bacillus* y *Pseudomonas*. Es preciso

aclarar que la biodegradación y biotransformación de plásticos como PET, PE o PVC no debe estar relacionado íntimamente a los microorganismos sino a su potencial enzimático y los genes relacionados.

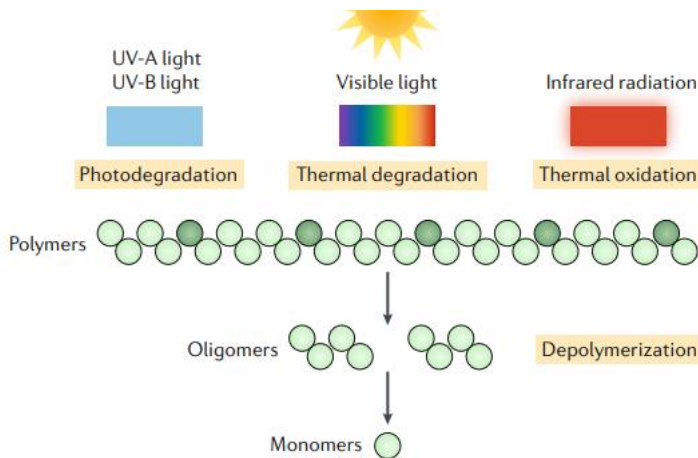
Mecanismos de Acción para la Biotransformación y Biodegradación de Plásticos

Mediada por Microorganismos

Los mecanismos de acción de los microorganismos en la biodegradación y biotransformación de plásticos, hace referencia a los procesos enzimáticos relacionados para la síntesis de estos materiales llevados a cabo en tres etapas importantes: hidrólisis, despolimerización y mineralización. Los microorganismos se han considerado como una posible solución a la contaminación por plástico en ambientes acuáticos. La degradación de plásticos en la naturaleza inicia con el debilitamiento de los enlaces de carbono debido a su exposición a los rayos ultravioletas (UV) al igual que ocurre durante los tratamientos térmicos de procesos tradicionales como la incineración o la pirólisis catalítica, anteriormente descritos como se evidencia en la Figura 8. Los microorganismos inician con la colonización de la superficie del plástico formando una biopelícula para realizar la biodegradación de este material. La lixiviación de moléculas pequeñas de plásticos que han residido en el agua de mar estimula el asentamiento microbiano y, en consecuencia, el despliegue de sus procesos metabólicos. Los microorganismos absorben los polímeros y los oxidan extracelularmente, razón por la cual el peso molecular (Mw) del polímero debe ser lo suficientemente bajo (<500Mw) para atravesar las membranas celulares (Yoon et al., 2012).

Figura 8

Mecanismo de Degradación de Plástico



Nota. Mecanismo de degradación de plástico a partir de reacciones fisicoquímicas del medio ambiente, y aespolimerización de plásticos mediada por microorganismos. Tomado de Amaral-Zettler et al., 2020

Los plásticos que son hidrolizables, es decir, polímeros con cadenas principales compuestas por componentes distintos de C-C o C-H (por ejemplo, PET), tienen más probabilidad de ser sustratos para la degradación microbiana *in situ* que los polímeros no hidrolizables que se encuentran generalmente en el medio marino pelágico como el PE y el PVC (Krueger et al., 2015). Las enzimas más efectivas para la degradación de polímeros como el polietileno son aquellas que degradan alcanos como el hexadecano (Yoon et al., 2012). Una cepa *Pseudomonas* mesófila aislada a partir del suelo de una playa con PE de baja densidad como única fuente de carbono, es uno de los ejemplos que describe su potencial de biodegradación de plásticos no hidrolizables (Yoon et al., 2012); aun así, se ha demostrado que la biodegradación del PE no ocurre comúnmente en condiciones

ambientales y, en caso de que ocurran, resultan en tasas de degradación muy reducidas (Amaral-Zettler et al., 2020).

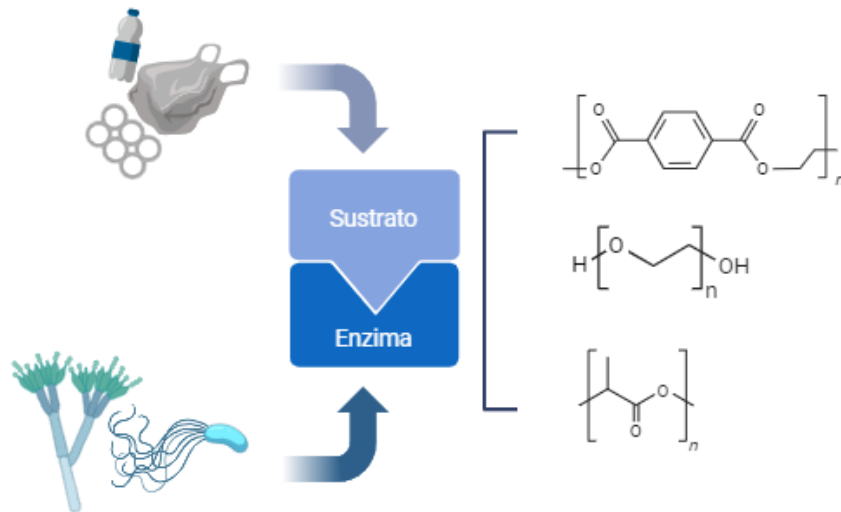
Los plásticos fácilmente hidrolizables como PET, poliamidas o poliuretano, son susceptibles a degradación por vías enzimáticas preexistentes en microorganismos (como las hidrolasas extracelulares que intervienen en la degradación de celulosa y proteínas), a pesar de ello, en condiciones ambientales naturales, una completa biodegradación se ve restringida debido a la disponibilidad de nutrientes y las resinas protectoras de los residuos plásticos. Los estudios presentan un sesgo en el proceso debido a que generan una preparación previa de los polímeros en que los disponen para su biodegradación sin ninguna capa protectora (Amaral-Zettler et al., 2020).

Desde una óptica más detallada con relación a la biodegradación de plásticos, es imperioso reconocer las enzimas específicas responsables de este proceso biodegradativo, así se destaca la bacteria *Ideonella sakaiensis* que posee la enzima PETasa responsable de la degradación de polímeros de PET (Yoshida et al., 2016). Así mismo, los metagenomas detectados en el ecosistema de la plastisfera han permitido determinar 108 genes marinos y 25 terrestres relacionados con la degradación de plástico que podría ser ubicua en ambos hábitats (Danso et al., 2019). A pesar de ello, tanto la hidrólisis microbiana incompleta o la oxidación extrema mediante la biotransformación microbiana resultan en la generación de nanoplásticos. (Hussain et al., 2001).

Los procesos biológicos de degradación de plásticos incluyen la acción mecánica de organismos que se desarrollan en las hendiduras o grietas de la superficie del polímero, sumado al proceso enzimático que consiste en hidrolizar el plástico en oligómeros y en última instancia, en monómeros (Figura 9) (Krueger et al., 2015).

Figura 9

Despolimerización de Plástico



Nota. Despolimerización de plástico generada a partir de la acción enzimática de hongos y bacterias.

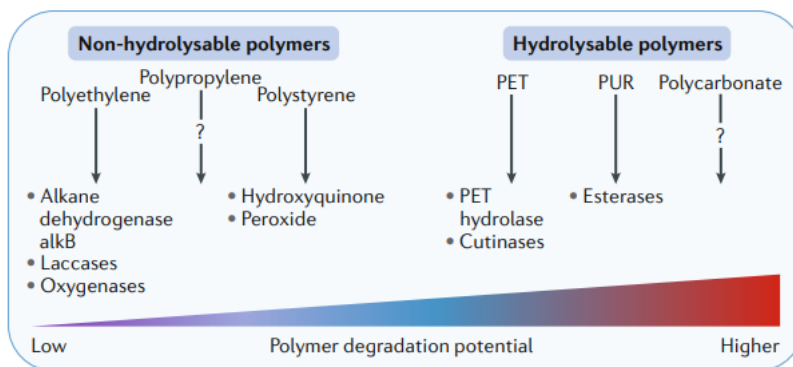
El PE contiene cadenas estructurales muy estables y son difíciles de degradar, mientras que el PET es susceptible a la hidrólisis y a las enzimas que catalizan estas reacciones (Krueger et al., 2015).

En la Figura 10 se muestra la efectividad de la degradación de los plásticos hidrolizables PET, poliuretano (PUR) y policarbonato (PC), y los no hidrolizables PE, polipropileno (PP) y poliestireno (PS); así como las enzimas que intervienen en este mecanismo de acción. La misma figura muestra que el potencial de degradación de los polímeros es menor en los plásticos no hidrolizables y mayor para los plásticos hidrolizables. El plástico con menor potencial de degradación es el PE y el de mayor potencial es el PC. Entre las enzimas degradadoras de los plásticos de interés se reconocen

la alcanodeshidrogenasa Alk B, las lacasas y oxigenasas para el plástico PE; y las enzimas PET hidrolasas y cutinasas para el plástico PET (Amaral-Zettler et al., 2020).

Figura 10

Enzimas que Actúan en la Degradación de los Plásticos



Nota. Enzimas que actúan en la degradación de los plásticos pe, pp, ps, pet, pur y pcb y, su potencial de degradación de plásticos. Tomada de Amaral-Zettler et al., 2020

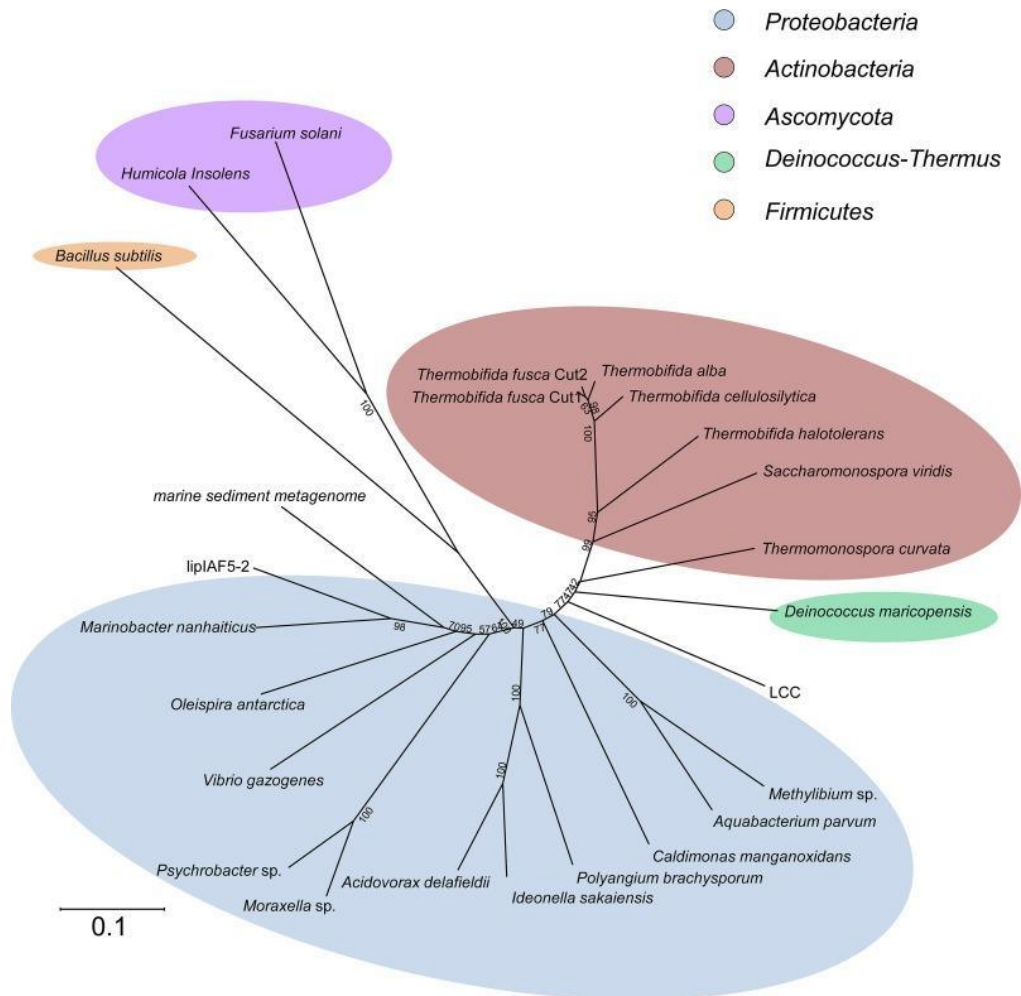
Los estudios relacionados permiten concluir que los mecanismos de acción para la degradación de plásticos, han sido más explorados en organismos del reino Bacteria dentro del ecosistema de la plastisfera, sin embargo, se ha determinado que organismos del reino Fungi también presentan procesos enzimáticos de degradación de plásticos y sus resinas protectoras como el Bisfenol A (Carstens et al., 2020).

Por la abundancia de residuos PET que ha movilizó el estudio de las enzimas PET hidrolasas y sus genes asociados (Danso, Schmeisser, Chow, Zimmerman, Wei, Leggewie, et al., 2018). En la Figura 11 se muestra el árbol filogenético de dichos genes degradadores asociados para las divisiones *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Ascomycota*, *Deinococcus-Thermus* y *Firmicutes* pertenecientes al reino Fungi, y las divisiones (phyla) como *Bacillus* (Firmicutes), *Thermobifida* (Actinobacteria) y *Vibrio* (Proteobacteria) pertenecientes al

reino Bacteria, los cuales cuentan con la enzima PET hidrolasa para la biodegradación de plástico.

Figura 11

Árbol Filogenético de las Bacterias y Hongos Biodegradadores de Plástico



Nota. Árbol filogenético de las bacterias y hongos biodegradadores de plástico que presentan la enzima pet hidrolasa clasificadas por filo. Tomada de Danso, Schmeisser, Chow, Zimmerman, Wei, Leggewie, et al., 2018

En la Tabla 2, se exponen algunos de los genes relacionados con la degradación del plástico y el microorganismo en el que fue identificado cada gen.

Tabla 2*Genes Relacionados con la Degradación de Plástico*

Microorganismo	Identificador	Gen	Fuente
<i>Sacchamonospora viridis</i>	W0TJ64	Cut190	(Kawai et al., 2014)
<i>Thermobifida fusca</i>	E9LVI0	Cut1	(Dresler et al., 2006)
<i>Thermobifida fusca</i>	E5BBQ3	Cut-2	(Chen et al., 2008)
<i>Thermonospora curvata</i>	D1A9G5	Tcur_1278	(Wei et al., 2014)
<i>Thermobifida alba</i>	E9LVH7	Cut1	(Hu et al., 2010)
<i>Thermobifida cellulosityca</i>	E9LVH9	Cut2	(Acero et al., 2011)
<i>Ideonella sakaiensis</i>	A0A0K8P6T7	ISF6_4831	(Yoshida et al., 2016)
<i>Thermobifida halotolerans</i>	H6WX58	N/A	(Ribitsch et al., 2012)

Nota. Adaptado de Danso, Schmeisser, Chow, Zimmerman, Wei, Leggewie, et al., 2018.

Investigaciones y Patentes Relacionadas con la Biodegradación y Biotransformación de PET, PE y PVC Mediada por Hongos y Bacterias

Para la identificación de los estudios y registros de patentes relacionados con la biodegradación y biotransformación de plásticos mediada por microorganismos, se realizó un análisis bibliométrico con la plataforma de búsqueda de propiedad intelectual *The Lens* y la herramienta de visualización *VOSviewer*, para ello se formularon las siguientes 2 ecuaciones de búsqueda relacionadas con las palabras clave de esta revisión y que pretenden:

Ecuación 1: ("polyethylene terephthalate" OR "polyethylene" OR "polyvinyl chloride") AND (biodegradation OR bioremediation) AND (method* OR process) AND (biotech*) AND (class_cpc.symbol:C12P* OR class_cpc.symbol:B09B* OR class_cpc.symbol:C08J*)

Con esta ecuación de búsqueda se identifican los desarrollos tecnológicos y patentes de procesos biotecnológicos relacionados con la biodegradación de los plásticos de interés (PET, PE y PVC), teniendo en cuenta las palabras clave de esta investigación; para lograr mayor especificidad en los resultados encontrados, se utilizó la clasificación CPC. El día 3 de junio de 2024 se identificaron 600 familias de patentes como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Familias de Patentes y Registro de estas

Patent Records 600	Simple Families 600	Extended Families 537
Cited Patents 1,224	Cited By Patents 1,049	Patent Citations 16,553
Cites NPL 1,075	NPL Citations 50,702	Resolved NPL Citations 36,379

Nota. Familias de patentes y registro de estas hasta el día 3 de junio de 2024 relacionada con los desarrollos biotecnológicos sobre biodegradación de PET, PE y PVC. Tomado de Lens.org

- Ecuación 2: ("polyethylene terephthalate" OR "polyethylene" OR "polyvinyl chloride") AND (biodegradation OR bioremediation) AND (method* OR process) AND (biotech*)

Con esta ecuación de búsqueda se obtuvieron artículos científicos citados por patentes relacionados con métodos y/o procesos de biodegradación de PET, PE y PVC. En

la imagen 14 se muestran los resultados de búsqueda del día 31 de mayo de 2024, en donde se encontraron 273 artículos citados por patentes.

Figura 13

Artículos Citados por Patentes y Trabajos de Investigación Relacionados con estas

Scholarly Works 273	Works Cited By Patents 273	Citing Patents 1,639
Patent Citations 1,782	Works Cited By Scholarly Works 272	Scholarly Citations 41,622

Nota. Artículos citados por patentes y trabajos de investigación relacionados con estas hasta el día 31 de mayo de 2024 sobre la biodegradación de PET, PE y PVC. Tomado de Lens.org

En Lens.org se tiene en cuenta los códigos de clasificación CPC de la Oficina Europea de Patentes (EPO), estos se clasifican con letras asociados a diferentes áreas de investigación, la letra “A” es asignada para las patentes de necesidades comunes de la vida, la “B” sobre diversas técnicas industriales de transporte, la “C” sobre química y metalurgia, la “D” sobre textiles y papel, la “E” sobre construcción, la “F” sobre calefacción, armamento, voladura, equipos mecánicos, la “G” sobre física, la “H” sobre electricidad, y la “Y” que reúne nuevos desarrollos tecnológicos (European Patent Office, 2019).

En la ecuación 1 se tiene en cuenta la clasificación CPC para mayor especificidad de la búsqueda como se mencionó anteriormente, las clasificaciones y subcategorías tenidas en cuenta pertenecen a las letras “C” y “B”. Las categorías de la letra C fueron: C08J y C12P; la categoría C08J se refiere al tratamiento de macromoléculas, la subcategoría tenida en cuenta fue C08J 11/10 relacionada con la despolimerización de residuos plásticos (European Patent Office, 2022). Finalmente, la categoría C12P se relaciona con procesos

enzimáticos para la síntesis de compuestos, las subcategorías tenidas en cuenta fueron C12P 1/00 asociado con procesos en general que involucran microorganismos o enzimas, y C12P7/00 vinculado al tratamiento de polímeros (European Patent Office, 2024).

En la Figura 14 se enseñan los microorganismos mencionados dentro de las patentes registradas relacionadas con las palabras clave, en ella también se muestran algunas biofábricas como *Saccharomyces cerevisiae* (Jiyeon et al., 2017), o *Escherichia coli* (Anca M. & Robbert, 2003) utilizadas para la biodegradación de plástico; también es nombrado *Homo sapiens* representando al ser humano como factor relacionado con la acumulación de plástico en diferentes ecosistemas. Para la construcción de esta nube de palabras, se utilizó el filtro del tamaño de la familia, teniendo en cuenta el grupo simplificado de patentes. El recuento más alto (534) corresponde a 'Desconocido/Artificial' (del inglés *Unknown/Artificial*), que engloba todos los aislados microbianos que han sido deliberadamente modificados (artificiales) y/o están protegidos por derechos de propiedad intelectual.

Figura 15

Principales Propietarios Intelectuales de las Patentes



Nota. Principales propietarios intelectuales de las patentes relacionadas con la biodegradación de residuos plásticos (PET, PE y PVC). Tomado de Lens.org

En el análisis bibliométrico, se puede evidenciar el interés académico e investigativo sobre la biodegradación de plásticos inició en la década de los noventa; cabe resaltar que la identificación de residuos plásticos en ecosistemas marinos empezó a detectarse desde los años setenta como se mencionó al principio de este capítulo. Las investigaciones coinciden con el momento en que el plástico comenzó a ser un material clave en el desarrollo industrial y en la vida cotidiana del ser humano (Amaral-Zettler et al., 2020). Hasta el día 3 de junio se registran 273 artículos que han sido citados en patentes, con lo que se infiere que solo el 14% de la producción de artículos académicos (1883) se relaciona directamente con un desarrollo biotecnológico. En la Figura 16, se observa el comportamiento histórico de la publicación de artículos citados en patentes relacionadas con la biodegradación y biotransformación de PET, PE y PVC, que detona a partir del año 2000 y sitúa al 2005 como el año en de mayor publicación (16 artículos) con impacto directo en los desarrollos biotecnológicos de este tipo, patentables.

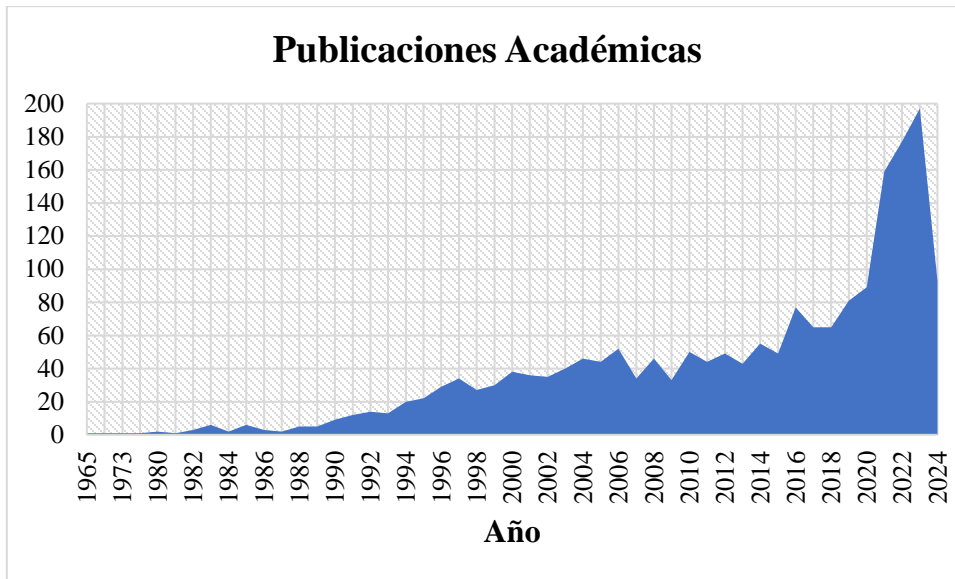
Cabe destacar que a partir del año 2020 y hasta la fecha, se evidencia un incremento absoluto (dato sin discriminación por citación en patentes) no antes registrado de publicaciones académicas (97% artículos, 3% otros) relacionados con la biodegradación de plásticos PET, PE y PVC (Figura 17) debido a la emergencia ambiental ocasionada por la acumulación de residuos plásticos en diferentes ecosistemas. Entre el año 2010 y 2019 se registra un promedio anual de 58 publicaciones académicas, frente a un promedio anual de 155 publicaciones a partir del año 2020 y hasta la fecha (año 2024 con corte a mayo registra 93 publicaciones académicas).

Figura 16

Histórico de Artículos Citados por Patentes



Nota. Histórico de artículos citados por patentes relacionadas con la biodegradación y biotransformación de PET, PE y PVC. Tomado de Lens.org

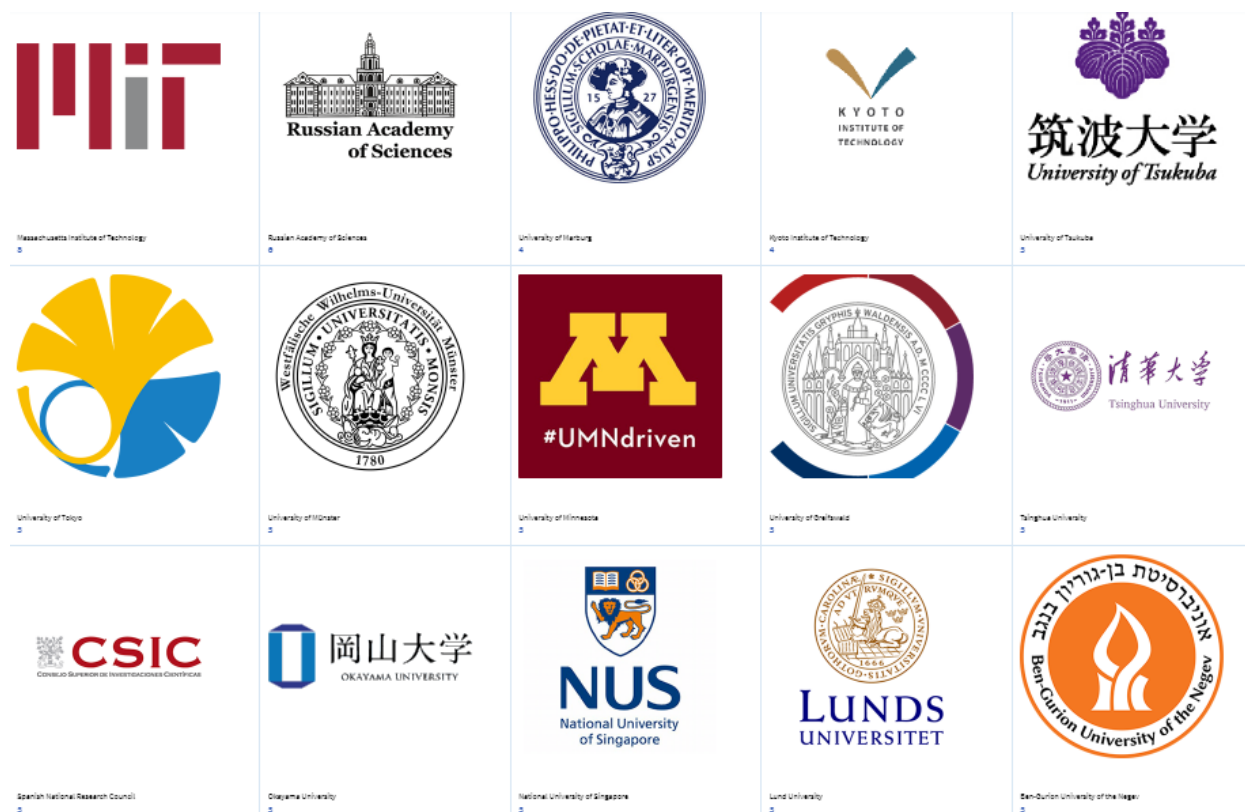
Figura 17*Total de Publicaciones Académicas*

Nota. Total de publicaciones académicas relacionados con la biodegradación de plásticos PET, PE y PVC. Adaptado de datos en Lens.org

Los reportes de patentes han sido mayormente reportados en China, Estados Unidos, India, Rusia y Corea como se muestran en la Figura 17. Sin embargo, la financiación de estos desarrollos biotecnológicos y la publicación de registro de patentes se centra en Estados Unidos y Reino Unido.

Figura 18

Principales Instituciones con Artículos Citados en Patentes



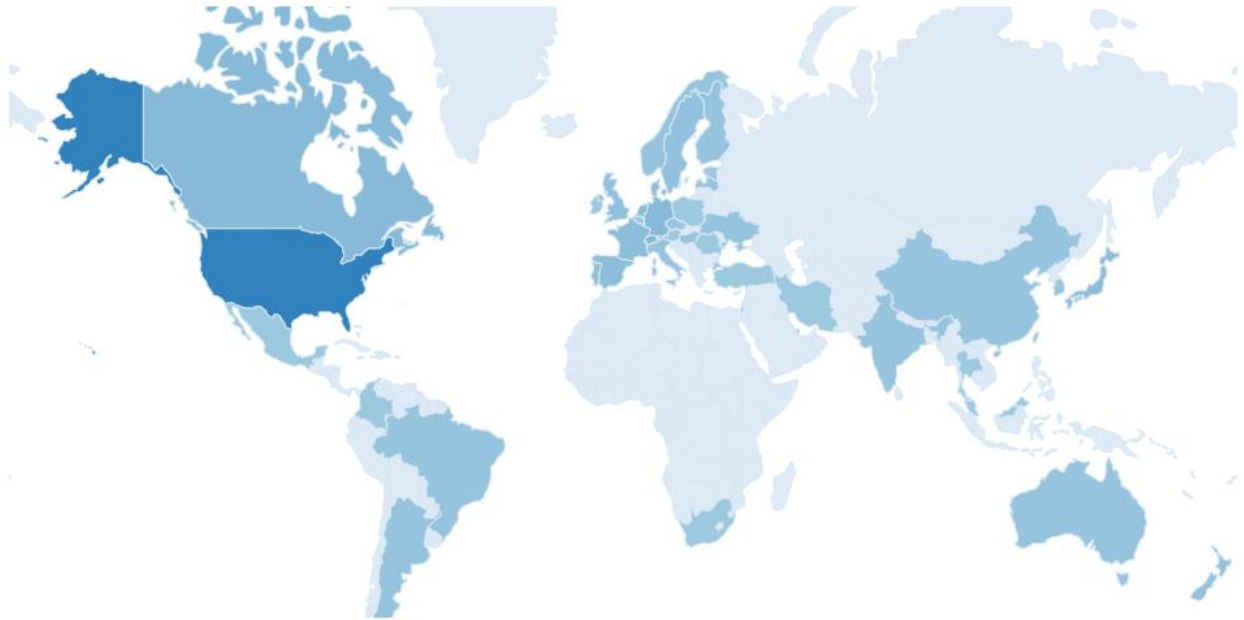
Nota. Tomado de Lens.org

Las principales entidades e instituciones que han publicado estos artículos académicos relacionados directamente con desarrollos biotecnológicos para la biodegradación de plásticos PET, PE y PVC son Instituto de Tecnología de Massachusetts, la Academia Rusa de Ciencias, el Instituto de Tecnología de Kioto, la Universidad de Marburgo, la Universidad Ben-Gurion del Negev, Universidad de Lund, la Universidad Nacional de Singapur, la Universidad de Okayama, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, la Universidad de Tsinghua, la Universidad de Greifswald, la

Universidad de Minnesota, la Universidad de Munster y la Universidad de Tokio, Universidad de Tsukuba (Figura 18).

Figura 19

Países que Participan en el Reporte de Patentes, Aplicación de Patentes y Patentes



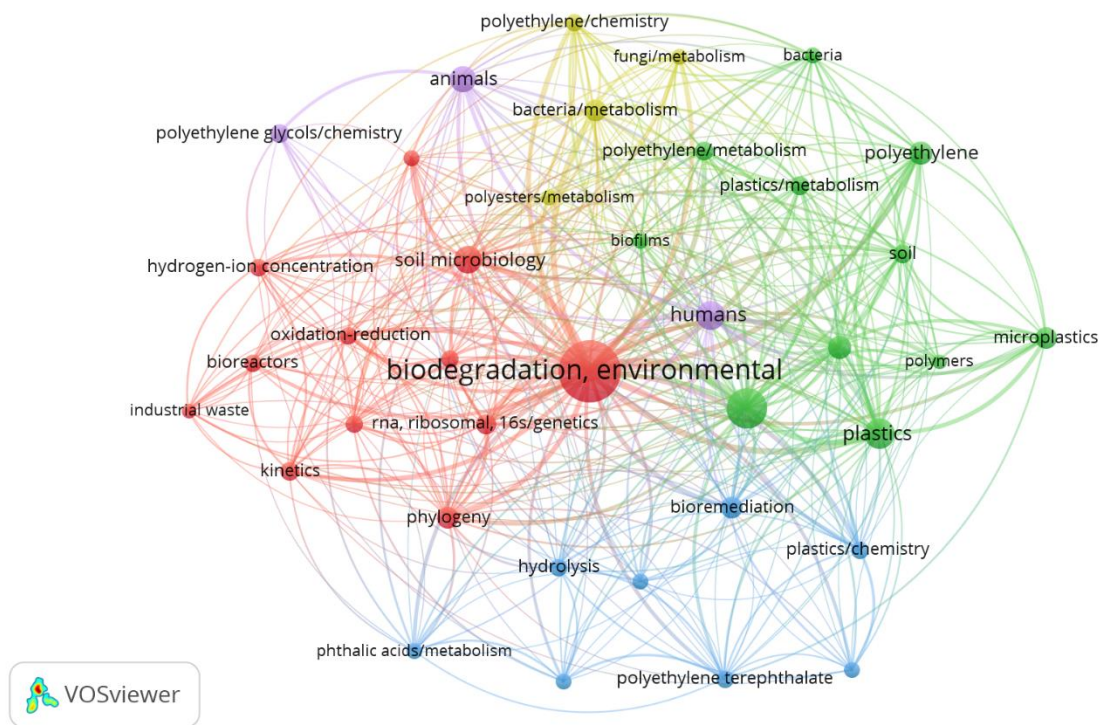
Nota. Países que participan en el reporte de patentes, aplicación de patentes y patentes conocidas de biodegradación y biotransformación de pet, pe y pvc mediada por microorganismos. Tomado de Lens.org

Finalmente, en la Figura 18, se muestra el análisis bibliométrico realizado en el software *VOSviewer*, con los datos obtenidos en *The Lens* con la segunda ecuación de búsqueda; se tuvo en cuenta un nivel de ocurrencia de 13, y el punto de corte predeterminado (51 palabras). Los términos centrales resultantes de la ecuación de búsqueda (fecha de búsqueda: julio 03 de 2024) están relacionados como clústers de colores rojo, verde, amarillo, azul y violeta. Los términos que representan el núcleo son

biodegradación y medio ambiente, los cuales tienen conexión con la totalidad de clústers relacionados con biopelículas, biotecnología, ecosistema, bioremediación, plásticos, microbiología del suelo, polímeros, bacterias, secuencias genéticas, y metabolismo. Entre los plásticos que se relacionan en los registros de patentes, se evidencia una co-ocurrencia relevante del polietilenteraftalato y el polietileno. Los clústers de color rojo representan la mayor ocurrencia, seguido por el color verde, el color amarillo, el color azul y por último el violeta.

Figura 20

Análisis Bibliométrico de Artículos Científicos Citados por Patentes



Nota. Análisis bibliométrico de artículos científicos citados por patentes relacionadas con métodos y/o procesos de biodegradación de PET, PE y PVC. Tomado de VOSviewer.

El clúster rojo se relaciona con las etapas de proceso, el clúster de color verde está vinculado con los plásticos y las biopelículas formadas en su superficie, el color amarillo con las rutas metabólicas de hongos y bacterias en la biodegradación de plásticos, el color azul refiere los componentes químicos, menciona procesos bioquímicos y macromoléculas; y el color violeta conecta las repercusiones que suceden al medio ambiente, a los humanos y a los animales por la acumulación de plástico.

Proceso de Biodegradación y Biotransformación de PET, PE y PVC Mediada por Hongos y Bacterias

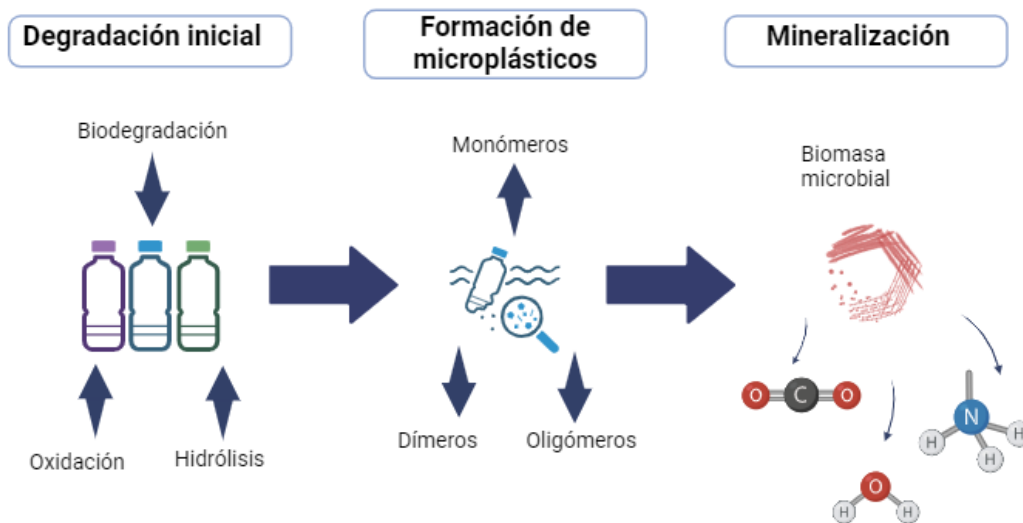
El proceso de biodegradación y biodeterioro de residuos plásticos mediado por microorganismos ha empezado a generar un gran interés debido a su rentabilidad y la implementación de técnicas respetuosas con el medio ambiente para la mitigación de microplásticos acumulados en diferentes ecosistemas. El proceso de biodegradación depende de los aditivos y si es o no hidrolizable el polímero como se mencionó anteriormente. La colonización de estas superficies la realizan bacterias, hongos, arqueas y algas asociadas; no obstante, ningún microorganismo puede eliminar totalmente un microplástico (Zahid et al., 2024). La biodegradación de este material implica la fragmentación, asimilación y mineralización del polímero que son llevadas a cabo por factores abióticos y bióticos (Zahid et al., 2024).

En la Figura 21, se muestran las etapas principales de la biodegradación de plásticos, estas consisten en la degradación inicial, la formación de microplásticos y la mineralización de las moléculas resultantes de la etapa anterior. En la primera etapa, enzimas como PET hidrolasa o las cutinasas generan la hidrólisis de los plásticos para lograr simplificar su estructura química, también ocurren reacciones de oxidación; las enzimas extracelulares (esterasas, lipasas, lignina peroxidasa, lacasas y manganeso

peroxidasa) son esenciales para elevar la hidrofilia de los polímeros plásticos y convertirlos en un grupo funcional carbonilo o un alcohol, que puede mejorar la unión microbiana y elevar la tasa de biodegradación (Miri et al., 2022). En la segunda etapa, se genera la simplificación de las moléculas de los polímeros, en primera instancia se producen los oligómeros, posteriormente los dímeros y finalmente los monómeros de los plásticos; en la Tabla 3 se registran los monómeros de algunos plásticos. Por último, en la etapa de mineralización ocurre como la biotransformación de los plásticos, la biodegradación de estos materiales resulta en la producción de biomasa, CO_2 , H_2O , y NH_3 .

Figura 21

Proceso de Biodegradación del Plástico Mediado por Microorganismos



Nota. Adaptado de Miri et al., 2022.

Tabla 3*Monómeros de Algunos Plásticos*

Plástico	Monómero
Bioplásticos	
Succinato de polibutileno	Butanodiol/ácido succínico
Ácido poliláctico	Ácido láctico
Succianato de polietileno	Etilenglicol/ácido succínico
Policaprolactano	Caprolactano
Polihidroxicanoatos	2-, 3-, 4- y 5-hidroxiácido graso
Ácido poliglicólico	A-hidroxiácido acético
Plásticos sintéticos	
Polietilenteraftalato	Teraftalato de etileno
Cloruro de polivinilo	Cloruro de vinilo
Poliestireno	Estireno
Politetrafluoroetileno	Tetrafluoroetileno
Poliéster	Éster
Polietileno	Etileno

Nota. Adaptado de Miri et al., 2022.

Selección de Materiales Poliméricos

Existe una baja variabilidad de procesos de biodegradación o biotransformación de microplásticos, estos se han implementado solo a nivel laboratorio (Miri et al., 2022). Uno de los sesgos de los estudios que más se evidencia es que, por lo general, la colonización

microbiana de plásticos tiene mayor efectividad en los plásticos sintéticos que contienen menos aditivos como el Bisfenol A (Carstens et al., 2020). La manera en que se consigue el plástico prístino es debido al desgaste de los aditivos de la superficie por medio de ligadura, o su desgaste natural causada por su transporte, o el desgaste microbiano de algunas especies de hongos de los filos *Ascomycetes* (Carstens et al., 2020).

Los microplásticos o trozos de plásticos a estudiar deben ser esterilizados en etanol al 70% durante 15 minutos con agitación, después de esto, el material se enjuaga 3 veces en agua destilada (Rosato et al., 2020).

Identificación de Cepas de Microorganismos Biodegradadores. La identificación de los filos y sus géneros pertenecientes al ecosistema de la plastisfera, ofrece una gran ventaja frente a la implementación de los microorganismos y sus enzimas para llevar a cabo la biodegradación de plásticos. A partir de la implementación de condiciones controladas de temperatura, pH, humedad y nutrientes disponibles, es posible conseguir la pérdida de peso total o parcial del plástico en un tiempo más corto en comparación a si se realiza in situ (Miri et al., 2022). Los microorganismos estudiados en diferentes investigaciones, son aislados a partir de lodos o arenas de los ecosistemas en donde han sido identificados, es decir, los hongos y/o bacterias degradadores son extraídos de ecosistemas marinos, terrestres o de agua dulce (Carstens et al., 2020; Rosato et al., 2020). El material plástico sujeto a degradación es previamente llevado a autoclave durante 1 hora repitiendo este proceso por 3 días consecutivos para eliminación de cualquier otro microorganismo invasor; después, los microorganismos con potencial biodegradador son inoculados al 5% v/v en un cultivo microbiano enriquecido con sedimentos marinos, la concentración de plástico que se utiliza en cada cultivo microbiano realizado oscila entre 4375 y 7500 MP/kg de sedimento; el tamaño de partícula de los sedimentos es de

aproximadamente 5 mm con el fin de no eliminar las células adheridas. (Rosato et al., 2020).

La cuantificación de crecimiento de biopelículas formadas en la superficie de los plásticos se realiza mediante i) extracción de ADN metagenómico, seguido de qPCR de genes ARNs 16S bacterianos o de genes de ARNr 18S fúngicos (la purificación de esta extracción puede realizarse por ejemplo, con el kit UltraClean Soil DNA); ii) posteriormente, se realiza la tinción de células de los microorganismos formadores de la biopelículas, con cristal violeta en caso de comunidades bacterianas y azul de lactofenol para hongos y; iii) finalmente, realizar la cuantificación de los azúcares reductores después de la hidrólisis alcalina de los polisacáridos para garantizar la base inicial de la biodegradación del plástico (Rosato et al., 2020).

Medios de Cultivo. El tipo de medio de cultivo utilizado en el proceso de biodegradación es un punto clave para su desarrollo. En caso de los hongos, el medio de extracto de malta al 2% con un pH de 5,7 (Carstens et al., 2020) o agar enriquecido con sales minerales, a razón de un volumen de 1000 L, contiene 0,7 g de fosfato monopotásico (KH_2PO_4), 0,3 g de fosfato dipotásico (K_2HPO_4), 0,5 g de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 2 g de nitrato de sodio (NaNO_3), 0,5 g de cloruro de potasio (KCl), 0,01 g de sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), y 0,01 g de Tween 802 (Vivi et al., 2019).

El agar completo utilizado para un consorcio microbiano que incluya hongos y bacterias contiene 10 g/L glucosa (como fuente de carbono), 5 g/L de peptona (como fuente

² Sustancia líquida oleosa miscible en agua, etanol anhidro, acetato de etilo y metanol, con densidad de 1,06 a 1,09 g/mL. Agente humectante y desinfectante que incrementa la capacidad de retener agua en el agar (Acofarma, 2022).

de nitrógeno), 6 g/L de fosfato de disodio (Na_2HPO_4 , buffer para mantener el pH), 3 g/L de fosfato monopotásico (KH_2PO_4 , buffer para mantener el pH), y 0,1 g/L de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, como fuente de magnesio) (Vivi et al., 2019; Yoshida et al., 2016).

Incubación de Microorganismos. La estandarización de parámetros como temperatura, pH y humedad relativa de hongos y bacterias biodegradadores de PET, PE y PVC es fundamental para estimular las rutas metabólicas específicas para tal fin, al tiempo que se asegure su viabilidad y crecimiento (Amaral-Zettler et al., 2020). Para tener en cuenta estos rangos de parámetros de proceso, también es preciso tener en cuenta el estrés fisiológico para la producción de enzimas degradadoras, debido a que a partir de este estímulo se activan mecanismos de adaptación y supervivencia en condiciones adversas las cuales les otorga la facultad para utilizar como fuente de C a estos polímeros sintéticos (Miri et al., 2022).

Para las bacterias, la temperatura puede afectar tanto la tasa de crecimiento como la eficiencia enzimática para la biodegradación de plástico; *Pseudomonas* suele tener una temperatura óptima de trabajo degradativo de 25°C a 30°C (Lin et al., 2023), y el filo *Ideonella* tiene una temperatura óptima para la actividad enzimática de PETasa en un rango de 30 a 37°C (Danso, Schmeisser, Chow, Zimmerman, Wei, Leggewie, et al., 2018); en el caso del pH, el rango sugerido es de 5 a 9 para asegurar la actividad enzimática y el crecimiento de consorcios bacterianos. Para la cepa *Delftia* WL-3 el rango sugerido de pH es de 6 a 9 (Liu et al., 2018); para *Ideonella* es de 7 a 8 (Danso, Schmeisser, Chow, Zimmerman, Wei, Leggewie, et al., 2018), y para *Pseudomonas* es 7 o un valor aproximado (Lin et al., 2023). La humedad es clave para asegurar los procesos metabólicos, el desarrollo microbiano y el proceso de degradación de plásticos. El rango sugerido es de

60% a 90%, valor que se garantiza en biorreactores o incubación *In vitro* con medios líquido o semilíquido, en presencia de agar o goma xantana y agua para favorecer el crecimiento microbiano y actividad enzimática (Yoshida et al., 2016)

Para el caso de los hongos, la temperatura, que influye en la tasa óptima de crecimiento y la eficiencia enzimática involucrada en la biodegradación de plásticos, es de 25°C a 30°C; en caso de *Aspergillus* el rango de temperatura óptima es de 25°C a 30°C (Vivi et al., 2019); y para *Penicillium* es de aproximadamente 25°C (Pardo-Rodriguez & Zorro-Mateus, 2021). El rango óptimo de pH para garantizar tanto crecimiento microbiano como actividad enzimática se encuentra entre 5,5 y 7; los microorganismos biodegradadores de plástico del reino Fungi pueden tolerar rangos amplios de pH, aun así, es recomendable mantener este parámetro cercano al neutro (Carstens et al., 2020). Finalmente, el parámetro de humedad es igual al de las bacterias, dado a que tanto hongos como bacterias prefieren condiciones de alta humedad relativa (Yoshida et al., 2016).

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de biodegradación mediado por hongos y bacterias es posible a nivel de laboratorio mediante cuartos de incubación, o a nivel piloto en biorreactores *Batch* (por lotes) asegurando las condiciones ambientales propicias para la biodegradación de plástico por acción microbiana (Baldera-Moreno et al., 2022). El tiempo de incubación de los microorganismos degradadores de plástico depende del material a tratar; los filos *Penicillium*, *Aspergillus* y *Chaetomium* registran una pérdida de peso del 40% al 75% de películas de PVC al cabo de 28 días (Saeed et al., 2022; Vivi et al., 2019); la cepa *Delftia* WL-3 consigue degradar el 94% de una película de PET durante 7 días (Liu et al., 2018). El PE es uno de los polímeros sintéticos más difíciles de degradar debido a que es una macromolécula no hidrolizable, razón por la cual el tiempo de proceso es más prolongado o requiere de tratamientos térmicos previos a la biodegradación.

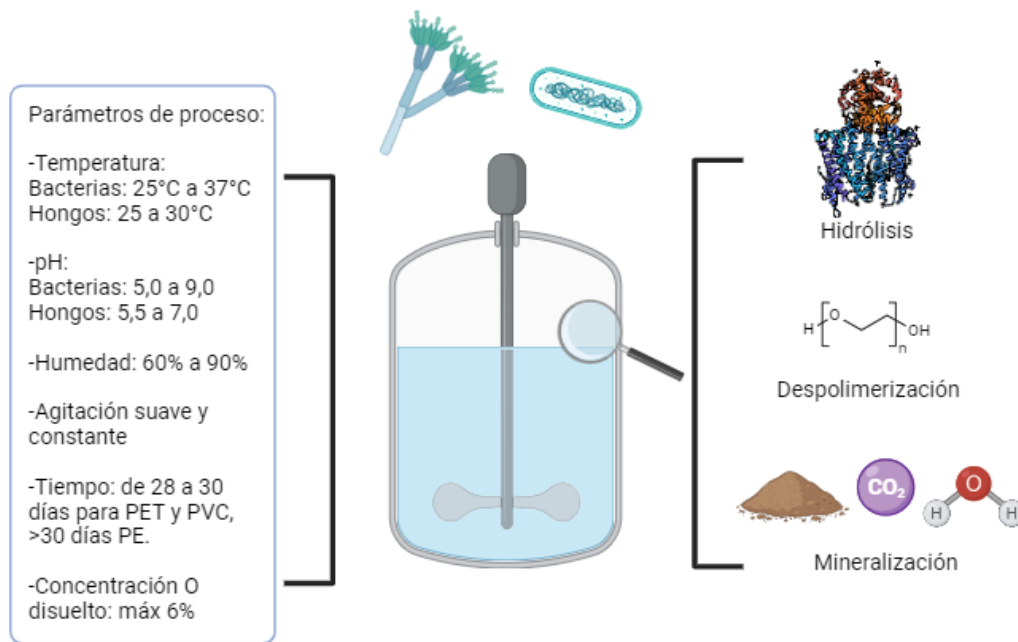
Pseudomonas genera una pérdida de peso de 20,54% a 28,80% de bolsas de PE durante 30 días (Zhang et al., 2022).

En cuanto a la agitación, en el proceso de biorreactores es necesario que sea constante y con baja velocidad para mantener la homogeneidad de nutrientes en el medio, asegurar la actividad microbiana y garantizar que el oxígeno disuelto en el sistema no supere el 6%, definido para el proceso anaeróbico (Baldera-Moreno et al., 2022).

Las etapas que ocurren dentro del biorreactor son la hidrólisis, la despolimerización y la mineralización de los residuos plásticos de PET, PE y PVC, las investigaciones sugieren generar un pretratamiento a estos materiales para la eliminación de la capa protectora de estos plásticos mediante rayos UV de forma artificial, rayos solares o procesos térmicos que generen un debilitamiento a estos componentes como el Bisfenol A (Amaral-Zettler et al., 2020). En la Figura 22 están representados los parámetros estandarizados antes mencionados.

Figura 22

Proceso Estandarizado en Biorreactor de la Biodegradación de PET, PE y PVC



Nota. Adaptado de Bergeson et al., 2024

Análisis de Eficiencia de Biodegradación de PET, PE y PVC. Los parámetros a tener en cuenta para medir la eficiencia de la biodegradación microbiana de hongos y bacterias en residuos plástico de PET, PE y PVC son la pérdida de peso del material, FTIR para monitorear las despolimerización y SEM para la caracterización morfológica y la composición química de la película del plástico durante su proceso de biodeterioro por la actividad microbiana (Saeed et al., 2022). Los materiales como el PET o PVC pueden resultar más fáciles de degradar en periodo de tiempo menos prolongado debido a su estructura química que los hace hidrolizables (Amaral-Zettler et al., 2020), según la investigación realizada a nivel laboratorio por Saeed et al., las cepas bacterianas de *Bacillus licheniformis* Sb1 y *Achromacter xylosoxidans* Sb2 lograron un 32,3% de pérdida de peso

de una película de PVC después de 28 días, y con las cepas fúngicas de *Aspergillus niger* Sf.1 y *Aspergillus glaucus* Sf.2 lograron una pérdida de peso de 40% de una película de este mismo material; el PVC en esta investigación se proporcionó como única fuente de carbono (Saeed et al., 2022). La biodegradación de plástico in situ mediado por microorganismos depende de varios factores, es primer lugar, el tipo de plástico en el que se desarrolla la degradación, esto debido a que existen polímeros sintéticos hidrolizables como el PET o no hidrolizables como el PE, la degradación de una macromolécula no hidrolizable no es posible de manera in situ (Amaral-Zettler et al., 2020); las condiciones en las que se desarrolla la biodegradación y los microorganismos también derivan un impedimento, pues los microorganismos al encontrar diferentes nutrientes disponibles, no requieren solo de estos residuos como fuente de C, lo cual retrasa el proceso de biodegradación y biotransformación (Miri et al., 2022).

Para la biodegradación del PET, su biodegradación mediada por actividad microbiana ha mostrado buenos resultados, en la investigación a nivel laboratorio realizada por Liu et al., la cepa bacteriana *Delftia* WL-3 puede degradar hasta el 94% de DET (dietil tereftalato), monómero de PET, durante 7 días como única fuente de carbono, las observaciones del SEM mostraron grietas significativas en la superficie de la película de PET después de 2 meses de inoculación de la cepa, esto demostró un potencial de ésta para la biorremediación en ambientes contaminados de PET (Liu et al., 2018).

El polietileno es una molécula no hidrolizable lo que hace que su degradación sea un poco más compleja (Amaral-Zettler et al., 2020). En la investigación de Brandon et al., se utilizaron las bacterias *Citrobacter* sp. y *Kosakonia* sp. del intestino del gusano *Tenebrio molitor* para la degradación de polietileno expandido logrando que una tasa de generación de CO₂ en la biodegradación de PE de $49,0 \pm 1,4\%$, y que su pérdida de peso fuera de 40,1

$\pm 8.5\%$ en un lapso de 32 días (Brandon et al., 2021). También, en la investigación de Khan et al., se muestra el potencial del hongo *Penicillium citrium* (cepa aislada del suelo de un vertedero en Bhopal, India) teniendo como referencia la pérdida de peso; el resultado al cabo de 90 días de incubación fue la reducción de 15,29% del peso de la película de PE de baja densidad (Khan et al., 2022).

Viabilidad desde los Factores Tecnológicos

Desde la gestión de residuos de PET, PE y PVC ha aumentado el interés en la evaluación de desarrollos biotecnológicos relacionados con el tratamiento de estos materiales. La viabilidad de la biodegradación de residuos plásticos depende en gran medida de la identificación y optimización de microorganismos, la estructura química de cada plástico, la disponibilidad y especificidad de los microorganismos y las condiciones intrínsecas que conduzcan al mejoramiento en la eficiencia de la biotransformación (Urbanek et al., 2018).

La degradación de plástico por acción microbiana presenta grandes desafíos, el desarrollo de la biodegradación de estos residuos mediado por microorganismos depende de las condiciones ambientales, la disponibilidad de tecnologías relacionadas con el proceso, la disponibilidad de microorganismos degradadores a nivel local y el apoyo institucional y/o gubernamental en proyectos relacionados (Ortiz-Ocampo et al., 2020).

Colombia tiene una alta diversidad de climas con zonas de alta humedad y temperaturas de 25 a 30°C adecuadas para la actividad microbiana, y biodiversidad de microorganismos principalmente en selvas y bosques con potencial para la biodegradación de plásticos (López et al., 2019). Se han venido implementado regulaciones en el país con el fin de reducir el uso de plásticos de un solo uso y la acumulación de estos residuos en diferentes ecosistemas, existen varios programas de Organizaciones no Gubernamentales

(ONGs) e instituciones educativas que promueven la investigación y el desarrollo de tecnologías verdes como la biodegradación de plásticos mediada por microorganismos (Ortiz-Ocampo et al., 2020). En Colombia existen capacidades para adaptar las tecnologías globales de biodegradación a las condiciones locales, más uno de los principales desafíos, es el requerimiento de una infraestructura idónea para poner en funcionamiento biorreactores y sistemas de manejo de residuos plásticos (Ortiz-Ocampo et al., 2020).

Proceso de Biodegradación de PET, PE y PVC

La degradación microbiana en las investigaciones se realiza de manera *in vitro* con cierta eficiencia; ahora bien, esta biodegradación cuando ocurre de manera natural sucede en tasas muy bajas, tanto en el suelo (0,1 a 0,4% de pérdida de peso en 800 días) como en el agua de mar (1,6 a 1,9% de pérdida de peso en 1 año) (Amaral-Zettler et al., 2020).

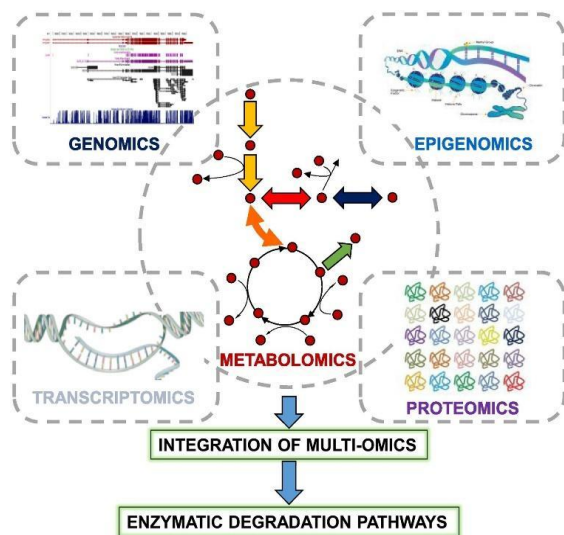
Mediante la comprensión del mecanismo de acción de las rutas enzimáticas de los microorganismos degradadores de plásticos, es posible proponer procesos de índole biotecnológico partiendo de la transgénesis (Zhang et al., 2022).

La formación de biopelículas generadas por el ecosistema de la plastisfera en la superficie de diferentes plásticos, ha ocasionado que estos microorganismos lleguen a diferentes ecosistemas y se desarrollen como especies alóctonas, perjudicando el hábitat natural de su entorno compitiendo por los nutrientes disponibles para los microorganismos endémicos del ecosistema al que llegan (Amaral-Zettler et al., 2020), debido a estas afectaciones, es posible considerar la utilización de biofábricas. Así las cosas, biofábricas como *E. coli* o *Saccharomyces cerevisiae*, se presentan como una alternativa para la biodegradación de plásticos como PET, PE y PVC. Desde esta misma perspectiva, la formulación de una biofábrica demanda el reconocimiento previo de las enzimas involucradas en la degradación microbiana de plástico, con lo que obliga la minería del

genoma de los microorganismos de interés, su análisis proteómico, su estudio epigenético y metabolómico para finalmente, proponer una biofábrica (organismo transgénico) para la degradación de plástico, con base en los análisis de expresión génica, esto es, mediante enfoque transcriptómico (Figura 23) (Zhang et al., 2022). Entre algunos de los géneros del reino Bacteria que también han sido utilizadas como biofábricas para la biodegradación de plástico podemos encontrar a *Ideonella* (Yoshida et al., 2016), *Bacillus* (Urbanek et al., 2018), *Pseudomonas* (Yoshida et al., 2016), *Rhodococcus* (Parales et al., 2002), *Streptomyces* (Singh Jadaun et al., 2022) y *Actinobacter* (Ortiz-Ocampo et al., 2020).

Figura 23

Identificación de la Vía Metabólica para la Biodegradación de Plástico



Nota. Identificación de la vía metabólica para la biodegradación de plástico mediada por microorganismos. Tomado de Zhang et al., 2022

La minería de genomas de microorganismos locales con potencial para la degradación de plásticos permite identificar secuencias de interés basado en funciones de degradación; el análisis metagenómico permite el reconocimiento de dichos genes

específicos relacionados con las enzimas responsables de la degradación del plástico. Los métodos más comunes para hallar el metagenoma e identificar las enzimas objetivo son por detección basada en secuencias y detección basada en funciones (DeCastro et al., 2016); de estos, el método más utilizado es la detección basada en funciones la cual aísla directamente las colonias de microorganismos que contienen las enzimas objetivo a partir de la identificación de actividad de las bibliotecas metagenómicas (Zhang et al., 2022). Posteriormente, se pueden aislar los genes de interés, clonarlos, producir una sobreexpresión³ de estos y, por último, caracterizar la biodegradación de plásticos como PET, PE y PVC (Zhang et al., 2022).

Meyer-Cifuentes utiliza en su estudio un enfoque metaómico integrado en donde incluye metagenómica, metatranscriptómica y metaproteómica para optimizar la identificación de las vías de degradación enzimática y tratar la biodegradación de polímeros sintéticos mediante un consorcio de microorganismos marinos (Meyer-Cifuentes et al., 2020). A partir de esta estrategia, se identifican enzimas similares a la PETasa y a la MHETasa para la biodegradación de plásticos; teniendo en cuenta que es posible optimizar este proceso mediante diferentes métodos, se contempla la transgénesis de la bacteria *Escherichia coli* para la expresión y síntesis de las enzimas necesarias en la ruta metabólica responsable de la degradación de plásticos (Onchonga-Nyakundi et al., 2023). Adicionalmente, las enzimas degradadoras de plástico modificadas genéticamente poseen una mayor interacción con el sustrato (polímeros sintéticos), una mayor hidrofobicidad, una mejor eficiencia catalítica, una mayor termoestabilidad y una biodegradación del plástico optimizada (BCC Publishing Staff, 2023).

³ Generación de numerosas copias de una proteína u otra sustancia (National Cancer Institute (NIH), 2022)

Propuesta General para un Proyecto de Investigación que Desarrolle un Sistema de Gestión de Residuos Plásticos por Biodegradación Biotecnológica. La identificación del ecosistema de la plastisfera ofrece una estrategia biotecnológica sostenible que puede brindar soluciones ante las implicaciones ambientales por la contaminación ocasionada por la acumulación de plásticos como PET, PE y PVC. La empresa floricultora Jardines de los Andes con 50 años de trayectoria, está ubicada en el municipio de Madrid, Cundinamarca. Esta empresa tiene un alto nivel de responsabilidad ambiental, cuenta con su propio centro de acopio en el que se seleccionan los residuos generados en las actividades de la entidad; muchos de estos residuos son utilizados para la generación de spin off con el propósito de transitar a una economía circular; junto a la UNAD de la sede CCAV Facatativá, se han ejecutado proyectos para la generación de procesos más sostenibles y en la transformación de residuos para la producción de nuevos productos a partir de los residuos clasificados y seleccionados del centro de acopio. Actualmente, Jardines de los Andes presenta acumulación de residuos de PET, PE y PVC que no han podido ser aprovechados, debido a esto, esta investigación pretende generar una propuesta general de investigación para la biotransformación de estos materiales.

Debido a que la biodegradación de residuos plásticos *in situ* no presenta altos grados de eficiencia, es necesario plantear un sistema en donde se puedan aprovechar dinámicas establecidas para la recolección de residuos plásticos, pero que también permita su fácil clasificación. En la industria, existen empresas que realizan procesos de biorreciclaje mediante el aprovechamiento de la capacidad para degradar enzimáticamente residuos plásticos. Estas empresas pueden formar alianzas estratégicas con la UNAD para el desarrollo de proyectos sostenibles y ecológicos para mitigar los residuos plásticos y sus consecuencias ambientales en el medio ambiente.

Para este planteamiento, se sugiere la implementación de una biofábrica como *Escherichia coli* como fuente de degradación de los residuos de PET, PE y PVC acumulados en Jardines de Los Andes. Esta facultad puede proporcionarse mediante la transgénesis de un organismo mediante la inserción de genes que codifican enzimas con capacidad de biodegradación y biotransformación de plástico, ya que permite la replicación de esta información genética y la mantiene en el organismo receptor (biofábrica) (Lara O'Farril, 2021), sin embargo, actualmente nos encontramos en la etapa de la identificación de enzimas degradadoras de los microorganismos de la plastisfera (Amaral-Zettler et al., 2020). Esta transgénesis de las enzimas degradadoras de plástico se realiza mediante plásmidos, la implementación de una biofábrica bacteriana como *E. coli*, debido a la tasa de replicación que permite un proceso más eficiente debido a su alta capacidad de clonación de la información genética transmitida.

La propuesta pretende continuar con proyectos de investigación parciales que propendan en conjunto por la ejecución de un macroproyecto para el desarrollo de un sistema de gestión de residuos plásticos por degradación biotecnológica mediante biorreactores por lotes para asegurar la biodegradación y biotransformación de PET, PE y PVC, aprovechando la previa recolección y clasificación de residuos generados en Jardines de Los Andes en su centro de acopio liderado por el personal de control ambiental, y evaluar la implementación en una escala piloto. El proceso de degradación biotecnológica se resume gráficamente en la figura 24.

Figura 24

Resumen Gráfico de las Etapas del Proceso de Degradación Biotecnológica

Nota. Resumen gráfico de las etapas del proceso de degradación biotecnológica en el marco de la sugerencia de un proyecto de investigación para la UNAD.

Estudio de Mercado

En el presente ítem, se estima estudiar las perspectivas de la biodegradación y biotransformación de plástico implementadas en industrias o empresas destinadas a estos procesos mediante acción microbiana aprovechando sus rutas metabólicas. Se pronostica una acumulación de microplásticos y nanoplásticos en el medio ambiente de 12.000 millones de toneladas métricas para el 2050. Los métodos biológicos para mitigar la contaminación plástica que involucra enzimas de varios microorganismos, han surgido como una alternativa eficiente, ecológica y eficiente al tratamiento y reciclaje de estos

residuos (BCC Publishing Staff, 2023). Las enzimas degradadoras de plástico también son conocidas como plasticasas o despolimerasas, este grupo de enzimas son capaces de descomponer varios tipos de polímeros sintéticos como el PET, PE y PVC (Tasman Research, 2024).

El mercado de productos microbianos como enzimas degradadoras de plástico ha experimentado un crecimiento en los últimos años debido a las consecuencias ambientales por la acumulación de estos residuos en diferentes ecosistemas y el aumento de regulaciones gubernamentales para su reducción (Tasman Research, 2024). La adopción de prácticas y estrategias sostenibles y la demanda de soluciones ecológicas, también ha impulsado el mercado (BCC Publishing Staff, 2023), los productos como las enzimas degradadoras de plástico cuentan con inversiones sustanciales en investigaciones y desarrollo en varias organizaciones, incluyendo instituciones universitarias, multinacionales y empresas emergentes que participan activamente en la investigación y desarrollo de nuevas enzimas o en la mejora de las enzimas degradadoras existentes para lograr su viabilidad comercial (Tasman Research, 2024).

Las cinco principales empresas en el mercado de productos microbianos por su participación en el mercado y oferta de productos según el reporte de BCC Publishing Staff son Chr. Hansen Holding A/S, DuPont de Nemours Inc., Novozymes A/S, Basf SE y Koninklijke DSM N.V. (BCC Publishing Staff, 2023).

Chr. Hansen es una empresa líder a nivel mundial en soluciones microbianas para la industria del sector alimentario, sanitario y agrícola; la gama de productos que ofrece incluye cultivos microbianos, enzimas y probióticos para su implementación en lácteos, carne y salud humana (Chr. Hansen, 2024). Los ingresos de esta empresa para el año 2021 se divide en dos segmentos principales: salud y nutrición (37,4%), y alimentación y

enzimas (62,6%); sus ganancias para este mismo año fueron de 1218 millones EUR, y sus beneficios antes de impuestos fueron de 292,9 millones EUR (BCC Publishing Staff, 2023); Chr. Hansen está ubicada en Dinamarca y cuenta con sedes en 30 países incluyendo Colombia, en la ciudad de Bogotá (CHR HANSEN, 2024), esta puede representar una alianza importante para la sugerencia del macroproyecto de investigación.

Novozymes es líder mundial en enzimas industriales y soluciones microbianas para diversas industrias como la agrícola, alimentaria y de bioenergía. Esta empresa brinda una gama de productos microbianos que incluye enzimas, microorganismos y biopolímeros para aplicación en nutrición animal, tratamiento de aguas residuales y biocombustibles. Novozymes opera principalmente en Dinamarca y tiene sede en 50 países alrededor del mundo, incluido Colombia (BCC Publishing Staff, 2023).

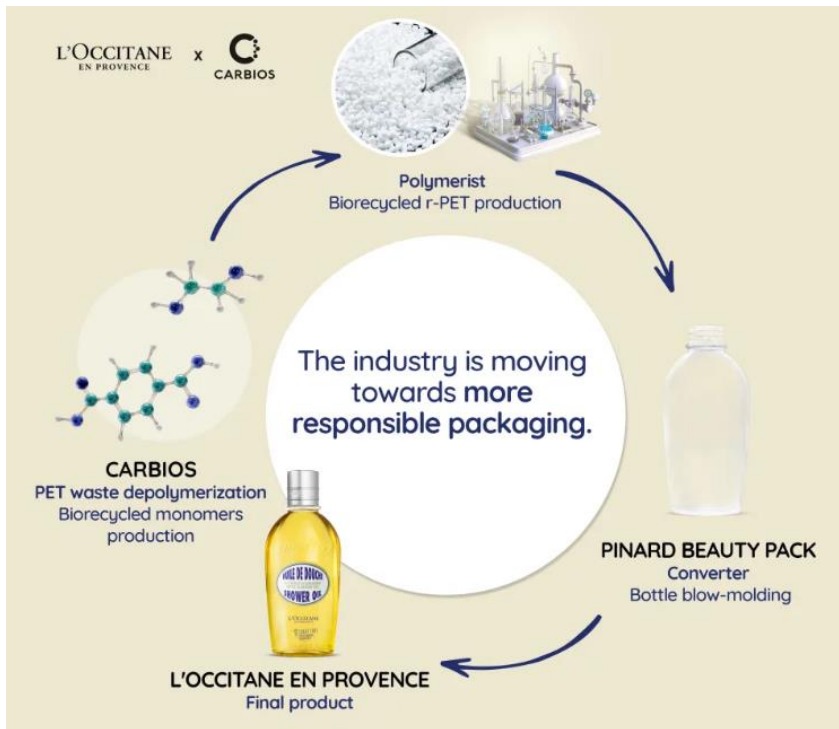
BASF es un productor líder de soluciones microbianas enfocadas a diversas industrias como el sector agrícola, alimentario y cuidado personal. Esta empresa ofrece productos como enzimas, ácidos orgánicos y ácidos grasos poliinsaturados para nutrición animal, procesamiento de alimentos y plásticos biodegradables. BASF tiene su sede principal en Alemania y en 80 países incluido Colombia (BCC Publishing Staff, 2023).

Carbios es una empresa francesa enfocada en el sector bioquímico y biotecnológico que desarrolla e industrializa soluciones biológicas para “renovar” el ciclo de vida de plásticos y textiles. Sus procesos biológicos se basan en el uso de enzimas para la degradación del plástico para mitigar su contaminación y acelerar la transición a la economía circular. Su proceso de bioreciclaje utiliza una enzima capaz de despolimerizar específicamente PET y empezó su comercialización en el 2022. Esta tecnología forma parte de un mercado en crecimiento con una producción global de 400.000 toneladas métricas en el 2022 y una proyección de 700.000 toneladas en el año 2026 (CARBIOS, 2022).

Los principales países que se han involucrado con el bioreciclaje y biodegradación de plástico por medio del servicio de Carbios son Francia, Alemania, Italia, Reino Unido y Estados Unidos. En un estudio realizado en EEUU se afirma que la implementación de una solución biotecnológica en donde se incorporan enzimas a los plásticos durante el proceso de producción de bioplásticos, genera un producto 100% compostable a temperatura ambiente que se descompone en menos de ocho semanas sin generación de microplásticos y/o residuos tóxicos, creando una circularidad completamente orgánica (Carbios, 2022).

Hay avances importantes relacionadas con nuevos desarrollos y alianzas estratégicas con la empresa Carbios, una de estas es la producción de una botella PET hecha a partir del reciclaje enzimático en colaboración con L'OCCITANTE; esta propuesta busca generar una circularidad del PET, desarrollando una botella plástica transparente hecha con un 100% de PET reciclado, el producto se expuso en la “*Edition Spéciale*” el 4 y 5 de junio de 2024. L'OCCITANTE menciona que es un paso clave para conseguir un diseño ecológico y generar una venta minorista con una distribución de botellas con PET 100% reciclado con sus productos para el año 2027. Estas botellas generan un 57% menos de emisiones de CO₂ (CARBIOS, 2024a). En la figura 25 se muestran las etapas en las que trabajó cada empresa aliada en la obtención de la botella hecha con biorreciclaje enzimático, la primera etapa consiste en la despolimerización de los residuos de PET a cargo de Carbios, la segunda etapa es la polimerización para la producción de PET biorreciclado, la tercera etapa consiste en moldear el material para la obtención de botellas a cargo de Pinard Beauty Pack, y finalmente la atribución de las especificaciones de estilo de la marca L'OCCITANTE (CARBIOS, 2024a).

Figura 25

Producción de Botellas con PET 100% Reciclado

Nota. Producción de botellas con PET 100% reciclado por Carbios y L'OCCITANTE.

Tomado de Carbios, 2024

La noticia más reciente de la empresa Carbios es la alianza entre Zhink Group, con quienes se pretende una asociación a largo plazo para el desarrollo a nivel industrial de biorreciclaje de PET en China para una capacidad de 50.000 toneladas al año, con este acuerdo, Carbios cuenta con un gran impulso con la tecnología de biorreciclaje con el país con mayor producción de PET a nivel mundial y así establecer su presencia en el mercado de producción de plásticos y bioplásticos (CARBIOS, 2024b).

Carbios está realizando inversiones y alianzas estratégicas con el sector privado y el sector público para avanzar en sus tecnologías e innovaciones; sin embargo, presenta

desafíos financieros que se reflejan en su rendimiento y valorización actual en el mercado. El desempeño bursátil de la empresa ha disminuido del 18,4% en lo que va del año en comparación con un aumento del 8,3% del índice CAC 40⁴ (Infront, 2024), indicando un rendimiento inferior. Cambios en las calificaciones de “*Strong Sell*”⁵ y “*Strong Buy*”⁶, presenta opiniones divergentes sobre su estabilidad financiera y el potencial de crecimiento de la empresa para los analistas del mercado (Infront, 2024).

Carbios se encuentra posicionado para avanzar en su tecnología de reciclaje enzimático y expandir su portafolio de patentes, habiendo multiplicado el número de patentes otorgados en los últimos años. Esta empresa está alineada con las tendencias de la transición a la economía circular y ha establecido alianzas estratégicas como con Novozymes, para la producción industrial de sus enzimas degradadoras de PET (CARBIOS, 2023).

⁴ CAC 40: Es el índice bursátil de referencia de la bolsa francesa que integra las 40 empresas más grandes y con mayor capitalización de Francia (Vásquez, 2020).

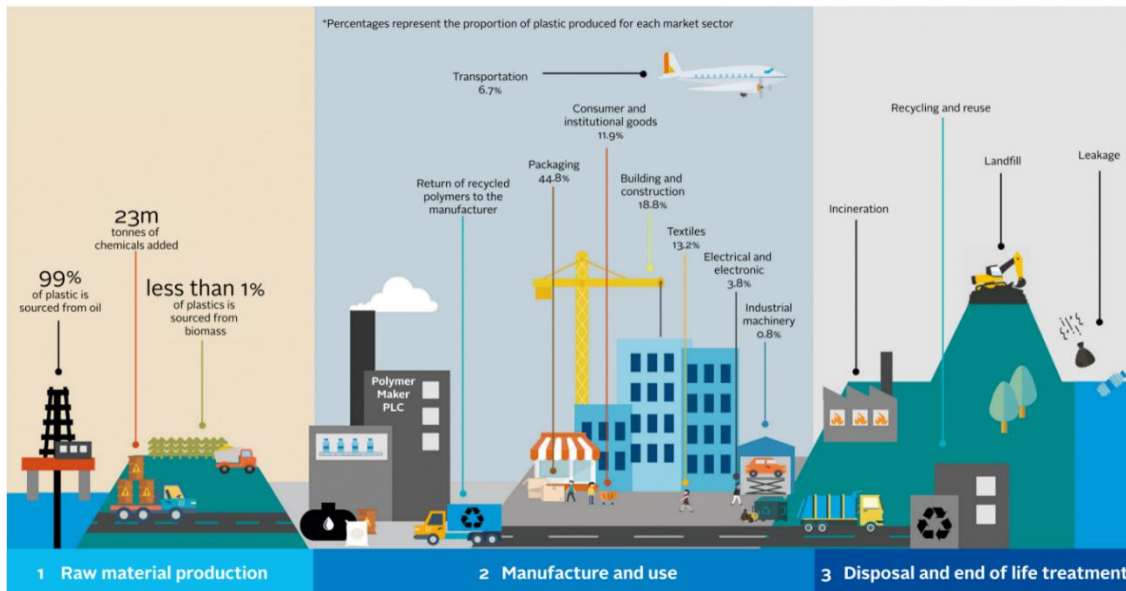
⁵ La calificación “*Strong Sell*” quiere decir que los fundamentos de la empresa son débiles y que hay riesgos significativos de inversión (Gunnars, 2023).

⁶ La calificación “*Strong Buy*” indica que la acción está significativamente subvalorada y que se proyecta que su valor aumente considerablemente (Downey, 2022).

Marco Regulatorio

La regulación del uso del plástico ha incrementado drásticamente en los últimos años debido a sus repercusiones ambientales, las cuales han afectado el aire debido a las emisiones generadas en su descomposición, afectación del agua por los lixiviados en el proceso de transformación tradicional por medio de pirólisis y afectación en el suelo por su composición química como moléculas cloradas, incidiendo en la calidad de nutrientes disponibles para las plantas y la presencia de microorganismos benéficos para los hábitats terrestres (UNCTAD, 2022).

Las políticas generadas a nivel mundial impactan directamente a las empresas de toda la cadena de valor del plástico, desde la obtención de las materias primas para su fabricación hasta el momento de su disposición final como se muestra en la Figura 26. Estas políticas, pretenden reducir la producción y consumo de plásticos, y así mejorar la gestión de estos residuos (James, 2019). En este capítulo, se sintetizarán las regulaciones, organizaciones y programas dirigidos al uso de plástico.

Figura 26*Cadena de Valor del Plástico*

Nota. Tomado de James, 2019

En la Figura 26 se muestran las tres principales etapas del ciclo de vida de los materiales plásticos, éstas son la producción de la materia prima, manufactura y uso, y finalmente la eliminación y tratamiento al final de su vida. En la primera etapa se encuentra la extracción de sus materias primas, el 99% de los plásticos provienen del petróleo, requieren de 23 mil toneladas de productos químicos añadidos y menos del 1% de los plásticos provienen de biomasa. El porcentaje de producción de plástico de algunos de los sectores es de 6,7% para transporte, 44,8% para embalaje, construcción 18,8%, 11,9% para bienes de consumo, un 13,2% para textiles, 3,8% para tecnología y un 0,8% para maquinaria industrial. Finalmente, en su disposición se llevan a cabo procedimientos tradicionales como la incineración de los residuos, reciclaje y/o reutilización para su fabricación o aprovechamiento, conducen los residuos a vertederos, o simplemente se

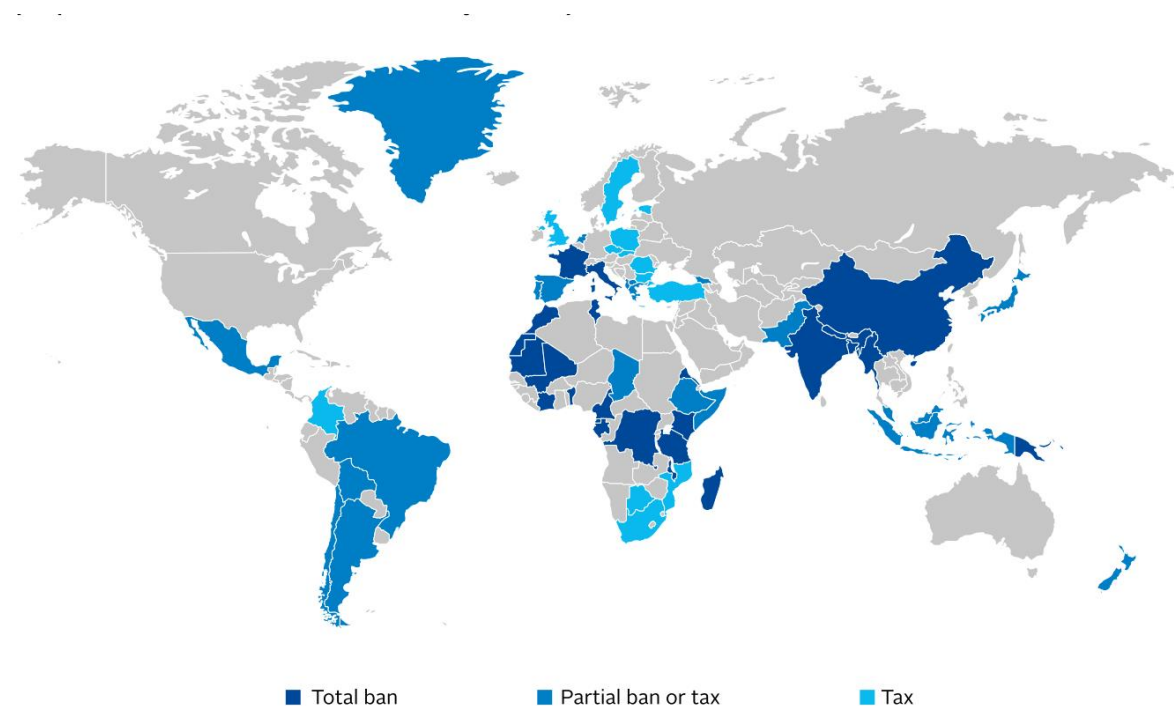
disponen en hábitats ocasionando múltiples repercusiones anteriormente descritas (James, 2019).

Regulaciones Ambientales del Plástico a Nivel Internacional y Nacional

Debido al incremento de contaminación de plástico en diferentes ecosistemas, las regulaciones nacionales e internacionales se han fortalecido con el fin de disminuir el consumo de plásticos de un solo uso por medio de políticas de prohibición y gravámenes como impuestos. Se estima que cada año en todo el mundo se consume un promedio de cinco billones de bolsas plásticas, el principal foco de regulación suelen ser las bolsas de polietileno de baja densidad (LDPE) no reciclables (James, 2019). En la Figura 27 se muestran los países que implementan prohibición total de bolsas de plástico (azul oscuro), un impuesto (azul cian), o una prohibición/impuesto parcial (azul). Los continentes que presentan mayor implementación de políticas de prohibición de la fabricación y uso de plásticos de un solo uso son África y Asia, en Suramérica también existe una gran extensión de territorio en el que se implementan regulaciones frente al uso del plástico de un solo uso mediante gravámenes o existe una prohibición parcial de estos. A pesar de no encontrarse sombreado, Canadá implementó una regulación de prohibición de plástico de un solo uso a finales del año 2023 (Government of Canada, 2024).

Figura 27

Países que Implementan Políticas de Prohibición Total de Bolsas Plásticas



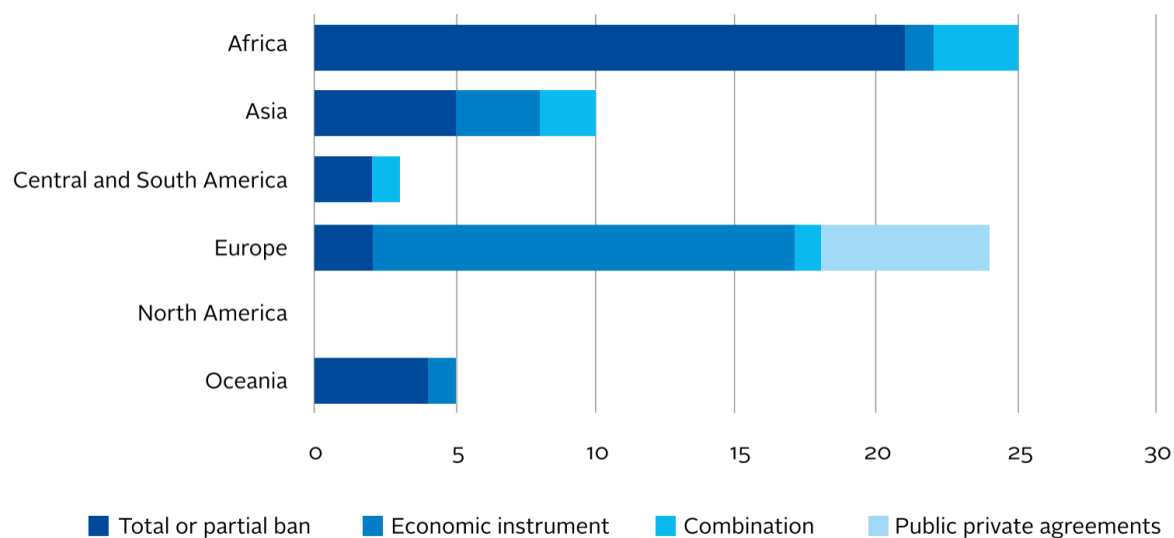
Nota. Países que implementan políticas de prohibición total de bolsas plásticas, prohibición o impuesto parcial, o impuesto. Tomado de James, 2019

Colombia es uno de los países con impuesto por la adquisición de plásticos de un solo uso. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estima que para el año 2030, el 100% de plásticos de un solo uso en el mercado sea reutilizable, reciclable o compostable (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Debido al contexto ambiental de cada país o región, se han planteado diferentes estrategias de regulación de residuos plásticos desde su producción, distribución, uso y disposición. A continuación, se mencionan las principales regulaciones implementadas a nivel internacional y nacional con las que se estima mitigar la acumulación de residuos plásticos.

Regulaciones Internacionales

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) junto con la Fundación *Ellen Macarthur* en el año 2018, lanzan el Compromiso Global para la Nueva Economía del Plástico en donde formar alianzas con empresas, gobiernos y otras organizaciones ambientales de todo el mundo con la visión común de conseguir una economía circular para el plástico en la que se estima que este material no sea residuo ni contaminante (United Nations Environmental Programme, 2023). Según un informe de la ONU, el 58% de África (25 países), ha prohibido la producción y uso de plásticos de un solo uso, estas políticas se empezaron a implementar en los años 2014 y 2017. En Norteamérica las políticas se han implementado a nivel estatal o municipal, las bolsas plásticas están prohibidas en Montreal (Canadá), California y Hawaii (Estados Unidos). Algunos países de Asia, como Bangladesh, prohibieron las bolsas plásticas hace una década, actualmente el continente se encuentra en la regulación de su fabricación y la generación de gravámenes por el uso de bolsas plásticas de un solo uso, sin embargo, la generación de políticas ha sido deficiente y las bolsas siguen en constante circulación registrando mala gestión de su disposición (James, 2019).

Figura 28*Regulación Continental de Producción y Uso de Plásticos*

Nota. Tomado de James, 2019

En la gráfica anterior, se muestra la cantidad de países que tienen políticas de prohibición total o parcial de producción y/o uso de plásticos de un solo uso por continente. Como se mencionó anteriormente, África cuenta con 25 países con medidas estrictas de producción y uso de plásticos, gran parte de sus políticas son la prohibición total o parcial de estas prácticas, también utilizan instrumentos económicos como gravámenes o tienen una combinación de estos. Europa en mayor medida utiliza los gravámenes, estrategias con convenios públicos, prohibición total o parcial, o una combinación de estas estrategias para lograr la reducción de la contaminación por plásticos. Para el año 2019, Norte América fue la región que menor regulación tuvo en cuenta a la producción y uso de plásticos de un solo uso hasta el año 2019 (James, 2019).

En la Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEA) realizada en el año 2022, se realizó un consenso entre gobiernos, industrias, académicos y organizaciones ambientales para la redacción del tratado internacional “*to the end plastic pollution*”, en el que todos los participantes recalcan con urgencia la implementación de cambios sustanciales en la cadena de valor de plástico, desde su producción, su consumo y su disposición (United Nations Environmental Programme, 2022).

La redacción de este tratado nace con el fin de generar un Comité de Negociación Intergubernamental (INC) y desarrollar acuerdos globales que aborden la contaminación por plásticos arrojados al medio ambiente, cubriendo todas las etapas de su ciclo de vida y adoptar un enfoque de economía circular para estos materiales. Este proyecto de regulación liderado por la UNEA 5.2, terminará de redactarse en el año 2024 para ser publicado e implementado como regulación internacional (United Nations Environmental Programme, 2022).

A partir del año 2020, Estados Unidos implementa la regulación internacional por el UNEP cobijado por el Congreso de Estados Unidos y la implementación de regulaciones federales relacionada con la prohibición parcial o los gravámenes al uso de los plásticos de un solo uso, además de esto, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA), orienta a este país a evaluar el uso de plásticos como embalaje de comida, cosméticos, envases de medicamentos y dispositivos médicos; el Congreso de Estados Unidos, las regulaciones federales, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y la FDA, se encargan de regular la generación de microplásticos y nanoplásticos mediante los estatutos de la Ley de Agua Limpia, Ley de Agua Potable Segura, Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA), Ley de Recuperación y Conservación de Recursos y Ley de Aire Limpio (Sorensen et al., 2023). Finalmente, en Canadá desde el año 2023 se realizó la

actualización de las Regulaciones de Prohibición de Plásticos de un Solo Uso (SUPR), el cual muestra un plan integral del gobierno canadiense para abordar la contaminación por residuos plásticos, su objetivo es conseguir contaminación cero por plásticos para el año 2030 y reducir la emisión de gases de efecto invernadero (Government of Canada, 2024).

El Compromiso Global cuenta actualmente con 500 signatarios, entre ellos se encuentran las empresas que generan el 20% del plástico a nivel mundial. La visión de este compromiso se basa en tres 3 pasos: eliminación de plásticos que no se necesitan, innovación para asegurar que el plástico que no es necesario, se recicle, se re-use o sea compostable, y la circulación de plástico que se usa para mantenerlo dentro de la economía y no en el ambiente (United Nations Environmental Programme, 2023).

Figura 29

Gobiernos Firmantes del Compromiso Global para la Nueva Economía del Plástico



Nota. Gobiernos firmantes del compromiso global para la nueva economía del plástico hasta el 2023. Tomada de United Nations Environmental Programme, 2022

En la Figura 29 se muestran los gobiernos nacionales, gobiernos subnacionales y gobiernos municipales firmantes del Compromiso Global hasta el año 2023. A continuación, se especifican los participantes.

Tabla 4

Gobiernos Nacionales Firmantes del Compromiso Global

País	Fecha incorporación	País	Fecha incorporación
Seychelles	Octubre 2018	Uganda	Febrero 2023
Chile	Octubre 2018	Noruega	Mayo 2023
Granada	Octubre 2018	Canadá	Confirmado para unirse
Portugal	Octubre 2018	Colombia	Confirmado para unirse
Francia	Octubre 2018	Italia	Confirmado para unirse
Reino Unido	Octubre 2018	República de Corea	Confirmado para unirse
Perú	Marzo 2019	España	Confirmado para unirse
Nueva Zelanda	Marzo 2019	Kenia	Confirmado para unirse
Ruanda	Octubre 2019	México	Confirmado para unirse
Países Bajos	Enero 2020	Tailandia	Confirmado para unirse
Grecia	Mayo 2022	Bélgica	Confirmado para unirse
Australia	Noviembre 2022	Ghana	Confirmado para unirse

Nota. Gobiernos nacionales firmantes del compromiso global para la nueva economía del plástico. Tomado de United Nations Environmental Programme, 2023

Tabla 5*Gobiernos Subnacionales Firmantes del Compromiso Global*

G. subnacional	Fecha incorporación	G. subnacional	Fecha incorporación
Gobierno escocés, Reino Unido	Octubre 2018	Estado de Baja California Sur, México	Confirmado para unirse
Gobierno valón	Octubre 2018	Estado de Sinaloa, México	Confirmado para unirse
Cataluña, España	Febrero 2019	Estado de São Paulo, Brasil	Confirmado para unirse
Estado de México, México	Junio 2019	Estado de Alagoas, Brasil	Confirmado para unirse
Gobierno Vasco, España	Octubre 2022	Estado de Bahía, Brasil	Confirmado para unirse
Ciudad de México, México	Mayo 2023	Estado de Ceará, Brasil	Confirmado para unirse
Estado de Quintana Roo, México	Junio 2023	Estado de Maranhão, Brasil	Confirmado para unirse
Departamento de Rocha, Uruguay	Noviembre 2023	Estado de Paraíba, Brasil	Confirmado para unirse
Gobiernos de Grecia Central	Confirmados para unirse	Estado de Pernambuco, Brasil	Confirmado para unirse
Estado de Baja California, México	Confirmado para unirse	Estado de Piauí, Brasil	Confirmado para unirse
Estado de Rio Grande do Norte	Confirmado para unirse	Estado de Sergipe, Brasil	Confirmado para unirse

Nota. Gobiernos subnacionales firmantes del compromiso global para la nueva economía del plástico. Tomado de United Nations Environmental Programme, 2023.

Tabla 6*Gobiernos Municipales Firmantes del Compromiso Global*

Ciudad	Fecha incorporación	Ciudad	Fecha incorporación
Copenhague, Dinamarca	Noviembre 2018	Buenos Aires, Argentina	Julio 2019
Liubliana, Eslovenia	Febrero 2019	San Miguel de Allende, México	Noviembre 2022
São Paulo, Brasil	Marzo 2019	París, Francia	Junio 2023
Austin, Texas	Marzo 2019	Querétaro, México	Confirmado para unirse
Toluca, México	Junio 2019	Ensenada, México	Confirmado para unirse

Nota. Gobiernos municipales firmantes del compromiso global para la nueva economía del plástico. Tomado de United Nations Environmental Programme, 2023

América del Sur fue de las últimas regiones en emprender protección al medio ambiente y más específicamente en la cadena de producción, uso y disposición de los plásticos, mientras que países como Canadá o México han generado estrategias jurídicas para mitigar o controlar las afectaciones al medio ambiente por su contaminación a partir de la prohibición de uso de plástico de un solo uso. Uno de los países que presenta mayor eficiencia en el estudio en Suramérica es Chile (Zúñiga Enríquez, 2021).

En 2018 en Chile, se pone en marcha la Ley 21100 la cual prohíbe el uso de bolsas plásticas en el comercio de todo el territorio con el objetivo principal de “la protección del Medio Ambiente”. En Latinoamérica, las medidas son mixtas dado a que existen

prohibiciones e instrumentos económicos con el fin de reducir los residuos plásticos que llegan a diferentes hábitats; los países de la región que cuentan con normatividad sobre la producción y uso de plásticos se muestran en la Tabla 7 con la legislación correspondiente.

Tabla 7

Países de Latinoamérica con Regulación sobre la Producción y Uso de Plásticos

País	Legislación
Chile	<i>Ley N°21100 del 2 de marzo de 2019.</i> Prohíbe la entrega y uso de bolsas plásticas del territorio nacional
Perú	<i>Ley N°30884.</i> Regulación de plásticos de un solo uso y recipientes o envases desechable.
Argentina	No existe una normativa, sin embargo, existe una alianza entre provincias y ciudades del país que han implementado ordenanzas en pro de la prohibición del uso de bolsas plásticas.
Ecuador	<i>Registro Oficial 354 del 4 de noviembre de 2020.</i> Racionalización y reciclaje de plástico, prohibición de plásticos de un solo uso.
Uruguay	<i>Ley N°19655 y Decreto N°3 del 2019.</i> Prohibición de la comercialización de bolsas plásticas de un solo uso.
Colombia	<i>Ley N°1973 de 2019.</i> Regula y prohíbe el ingreso y comercialización de bolsas plásticas de un solo uso en el departamento de Archipiélago de San Andrés, provincia y Santa Catalina e islas menores.

Nota. Países de latinoamérica con regulación sobre la producción y uso de plásticos de un solo uso. Tomada de Zúñiga Enríquez, 2021

Las alianzas entre organizaciones, gobiernos y empresas a nivel mundial son de gran importancia para generar acción ante la crisis del plástico. Las regulaciones globales tienen requerimientos que tratan de abarcar la gran mayoría de contextos, sin embargo, a

nivel nacional también se generan políticas de prohibición y regulación para el uso de materiales plásticos ante su impacto ambiental, teniendo en cuenta los contextos locales, regionales y nacionales.

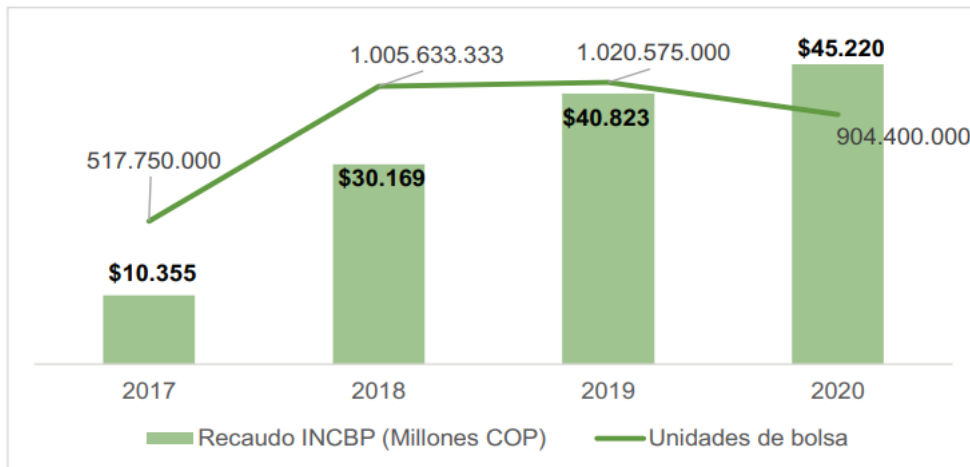
Regulación Nacional

En el año 2016 también nace la Política Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos del Departamento Nacional de Planeación publicado en el documento Conpes 3874 enfocado a la economía circular prolongando la vida útil de los productos y materiales. Los ejes principales de esta política fueron la innovación, cultura ciudadana sobre la gestión de residuos, educación, participación de todos los actores de la cadena, y el monitoreo del proceso y resultados (Vahos Padilla & Suárez Virviescas, 2022).

El alcance de la legislación colombiana con respecto a la producción, manejo y gestión de residuos de productos plásticos se cobija en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, más precisamente al ODS tres “Salud y bienestar”, seis: “Agua limpia y saneamiento”, doce: “producción y consumo responsable”, trece: “acción por el clima”, y catorce: “vida submarina. La Resolución 668 de 2016 nace de la problemática ambiental por el uso desmedido de bolsas plásticas de un solo uso (Araujo Cantillo et al., 2020). En Colombia se utiliza el Impuesto Nacional al Consumo de Bolsas Plásticas a partir de la Ley 1819 de 2016 en los artículos 207 y 208. A pesar de implementar una tarifa por el uso de bolsas plásticas, un reporte de la DIAN en el año 2021, en la Figura 30 se muestra que hasta el año 2020, el recaudo por el Impuesto al Consumo de Bolsas Plásticas fue mayor al uso de unidades de bolsa en el país, es decir, a partir de esta estrategia fue posible la reducción del uso de bolsas plásticas de un solo uso en Colombia (Rodríguez Vásquez, 2023).

Figura 30

Recaudo de la DIAN Mediante el Impuesto Nacional al Consumo de Bolsas Plásticas y Uso de Bolsas Plásticas de un Solo Uso en Colombia



Nota. Recaudo de la DIAN mediante el impuesto nacional al consumo de bolsas plásticas y uso de bolsas plásticas de un solo uso en Colombia. Tomado de Rodríguez Vázquez, 2023

En 2018, Colombia en la XIV Cumbre de la Alianza del Pacífico, hace parte de los países firmantes de la declaración Presidencial Sobre la Gestión Sostenible de los Plásticos, la Resolución 1407 de 2018 enuncia la reglamentación para la gestión de los residuos como envases o empaques de papel, plástico y vidrio. Mediante la Resolución 1342 de 2020, Colombia regula la producción de plástico bajo la política de manejo integral de residuos sólidos.

Colombia, en alianza con instituciones gubernamentales, efectúa la redacción de normativas con enfoque de desarrollo económico sostenible del país, una de estas políticas es la Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible la cual consta de siete principios: infraestructura sostenible (sistemas sostenibles a gran escala), fortalecimiento de regulación ambiental, impulsar el consumo responsable, fortificar del desarrollo

investigativo en producción y consumo sostenible, alentar a las entidades a concientizarse sobre el contexto ambiental mediante informes de sostenibilidad, optimización de la cadena de valor de los residuos plásticos (uso, aprovechamiento y comercialización) a partir de alianzas entre empresas y actores, y la promoción de emprendimientos y negocios verdes (Vahos Padilla & Suárez Virviescas, 2022).

Desde el año 2021, Colombia se unió al propósito del Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estima que para el año 2030, el 100% de plástico de un solo uso sea reutilizable, reciclable o compostable (materiales degradados por organismos biológicamente) (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Los avances de la regulación en la gestión del plástico han sido la prohibición de ingreso de plástico de un solo uso a PNN de Colombia, y la generación de los nuevos códigos de color para la separación de residuos (verde, negro y blanco). También, desde el año 2021 se efectuó el Plan para la Gestión Ambiental de Residuos de Envases y Empaques, y en el año 2020 se actualizó la reglamentación sobre la responsabilidad del productor. Actualmente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible sigue trabajando en la implementación de la Estrategia Nacional de Economía Circular en Colombia (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

En el año 2022, mediante la ley 2232 se manifiesta la prohibición de la producción y uso de plásticos de un solo uso a nivel de nacional (Ley 2232 de 2022, 2022), esta normativa empezó a regir en el país a partir del 7 junio del año 2024, sin embargo, los empaques de residuos peligrosos, madera y fibras de textiles, se encuentran excluidos del cumplimiento de esta reglamentación (Bohorquez Roncancio, 2024). Esta ley contempla la promoción de las alternativas sostenibles, y la eliminación de utensilios como bolsas y

pitillos de plástico que son fácilmente sustituibles según la Corte (Bohorquez Roncancio, 2024).

Organizaciones Nacionales e Internacionales

Los modelos de transición de procesos sustentables se desarrollan en diferentes nichos de conocimiento para el crecimiento de espacios, ejecución, tecnologías, participación social e institucionales a nivel regional en función de la estabilidad y estandarización global acorde a las políticas ambientales. Las organizaciones ambientales desempeñan un papel como actor intermediario en el cambio regional socio-técnico e inciden en el desarrollo de las regulaciones ambientales frente a las problemáticas generadas por el plástico (Jaso Sánchez & Goycochea Pineda, 2023). Es muy reciente la relevancia que ha tenido el manejo de residuos plásticos en los foros internacionales como el del Convenio de Basilea o del Acuerdo Climático de París; según la Agenda 2030 de la Organización de Naciones Unidas (ONU), esto se concibe en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12: “Garantizar patrones de producción y consumo sostenibles”; adicionalmente, el modelo de economía circular va alineado con el fin de este objetivo “Reducir sustancialmente la generación de residuos mediante la prevención, reducción, el reciclaje y la reutilización” (James, 2019).

Organizaciones Internacionales

Las regiones en donde se posicionan la mayor parte de organizaciones internacionales que generan impacto mediante actividades de investigación y pioneros en el desarrollo de productos biodegradables, procesos, modelo de negocio y generación de estrategias para regulación ambiental, se encuentran Asia, Norte América, Europa y Países Bajos (Jaso Sánchez & Goycochea Pineda, 2023). En la Tabla 8, se muestran las organizaciones con mayor incidencia en sus regiones y a nivel mundial:

Tabla 8

Principales Organizaciones Internacionales con Mayor Compromiso ante el Impacto Ambiental del Plástico

Nombre	País	Objetivo frente al impacto ambiental del plástico
UN Environmental Assembly (UNEA)	193 países (entre ellos, Colombia)	Establecer la agenda ambiental global que proporcione una orientación política general, y dar respuesta con éstas a problemáticas emergentes facilitando el intercambio de experiencias entre los miembros comprometidos con la reducción del plástico (James, 2019; UNEA, 2024).
Fundación Ellen Macarthur	Inglaterra	Proporcionar estrategias de economía circular frente a la crisis mundial de la producción y uso del plástico (Ellen Macarthur Foundation, 2023).
Alliance to End the Plastic Waste	Singapur	Establecer acciones para eliminar los residuos plásticos por medio de alianzas internacionales y acción colectiva (Alliance to End Plastic Waste, 2023).
The Commonwealth	Reino Unido	Generar alianzas internacionales para abordar la problemática de plásticos en hábitats marinos, y fomentar la consciencia sobre el uso de recursos naturales de manera sostenible para adaptarse al cambio climático (James, 2019; The Commonwealth, 2024).
Circulate Capital	Estados Unidos	Invertir en mitigar la contaminación de plásticos en el hábitat marino de Asia mediante economía circular en mercados de alto crecimiento (Circulate Capital, 2024; James, 2019).
Break Free From Plastic	Estados Unidos	Defender un futuro libre de contaminación plástica por medio de alianzas entre organizaciones internacionales, reclamar a la industria la reducción del uso del plástico de un solo uso, e impulsar soluciones duraderas (Break Free From Plastic, 2023; James, 2019).

Waste and Resources Action Programme (WRAP)	Reino Unido	Abordar la circularidad y eliminación de plástico de un solo uso a partir de la formación de una red global de acuerdos para tratar estos residuos de forma voluntaria (James, 2019; Waste and Resources Action Programme, 2024).
---	-------------	---

Los bioplásticos son polímeros obtenidos a partir de fuentes renovables o sintéticas obtenidos a partir de polisacáridos debido a su alto potencial para la formación de películas biodegradables, ejemplo de la fuente de polisacáridos es la papa, celulosa o quitaseno (Rimac León, 2019). El uso de bioplásticos se ha planteado como una posible solución ante la problemática ambiental debido a la contaminación de diferentes hábitats. Sin embargo, estos también repercuten negativamente en el medio ambiente debido a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero en su degradación y, por el uso y disposición final que le da el ser humano (Atiweh et al., 2021). Algunas de las organizaciones internacionales adicionales a las anteriormente mencionadas que implementan estrategias innovadoras frente al uso de bioplásticos y sus repercusiones, y al impacto ambiental de los plásticos en general son *Center for International Environmental Law* (CIEL), *Environmental Law Alliance Worldwide* (ELAW) y *Rethinking Plastic Alliance* (Jaso Sánchez & Goycochea Pineda, 2023).

Colombia hace parte de los países del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y de la Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEA), quienes determinaron en el año 2019 se había reciclado el 9% de 9000 millones de toneladas del plástico producido históricamente en donde la mayor parte termina en sitios de disposición final y en el ambiente (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). También existen organizaciones ambientales a nivel nacional que buscan

implementar estrategias para la eliminación de plástico en hábitats marinos y terrestres y así preservar la flora y fauna de diferentes regiones del país como se describe a continuación.

Organizaciones Nacionales

El Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible apuesta en el país a que el 100% de los plásticos de un solo uso sean reutilizables, reciclables o compostables (degradados por microorganismos). En algunas de las principales ciudades de Colombia como Bogotá y Medellín, se aprovechan 13 mil toneladas al mes de residuos plásticos gracias a la labor de los recicladores de oficio y de 260 industrias de estas ciudades. En Colombia se aprovechan 163 mil toneladas al año de materiales plásticos (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). A pesar de que se destacan pocas organizaciones ambientales, en la Tabla 9, se mencionan las más relevantes basado en la acción ante el impacto ambiental del plástico en Colombia.

Tabla 9

Principales Organizaciones Nacionales con Mayor Compromiso ante el Impacto Ambiental del Plástico

Nombre	Región	Objetivo frente al impacto ambiental del plástico
Fundación Malpelo y otros Ecosistemas Marinos %	Pacífico	Proteger la biodiversidad la fauna y flora del océano pacífico por medio de la eliminación de plástico en áreas marinas y costeras (Fundación Malpelo, 2024).
Fundación Bahía y Ecosistemas de Colombia	Cartagena	Efectuar la protección de la bahía de Cartagena en alianza con comunidades eco-dependientes para mitigar la contaminación plástica del mar promoviendo la adaptación de la ciudad ante el cambio climático con educación, alternativas económicas y ciencia (Fundación Bahía y Ecosistemas de Colombia, 2023).

Asociación Nacional de Recicladores (ANR)	Bogotá	Promover la reducción de contaminación por residuos plásticos por medio de la gestión de recicladores de oficio (Asociación Nacional de Recicladores, 2023).
Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC)	Bogotá	Efectuar por medio de estrategias tecnológicas y de innovación, el aprovechamiento de residuos plásticos y mitigar su contaminación (Instituto de Capacitación e Innovación del Plástico y del Caucho, 2024).
Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN)	Abarca todas las regiones del país	Fomentar el cuidado medio ambiental mediante la protección de hábitats a partir de iniciativas de eliminación de plásticos de un solo uso en los parques ubicados en zonas protegidas (Parques Nacionales Naturales, 2022).

Gran parte del desarrollo de investigaciones e innovación en Colombia se han llevado a cabo por instituciones educativas de educación superior como la Universidad de los Andes, Universidad Nacional, Universidad Distrital, Universidad de la Salle y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. Las organizaciones mencionadas en la Tabla 9 y las universidades involucradas en el desarrollo de investigaciones para la generación de nuevas estrategias hacen parte de la Mesa Nacional de Gestión Sostenible del Plástico y de Apoyo Técnico junto con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Conclusiones

Los microorganismos de la plastisfera pueden ser parte de una estrategia sostenible para la biodegradación y biotransformación de plásticos como PET, PE y PVC, esto debido a las enzimas degradadoras de plástico. La degradación de polímeros sintéticos mediada por hongos y bacterias *In situ* presenta tasas ineficientes generando microplásticos y nanoplásticos. Adicionalmente, los microorganismos degradadores que llegan adheridos a la superficie de los microplásticos a diferentes ecosistemas, suelen tener repercusiones negativas por la disponibilidad de nutrientes.

Sin embargo, al no haber una plastisfera establecida por categorías taxonómicas en los ecosistemas, es necesario partir desde la identificación de las enzimas degradadoras de los microorganismos relacionados, pero sin necesariamente recurrir a estos. Las investigaciones y empresas se centran principalmente en la identificación o mejoramiento de enzimas degradadoras y no limitar su transgénesis a los microorganismos de la plastisfera sino también a biofábricas como *E. coli* o *Saccharomyces cerevisiae*.

Actualmente, aún existe un proceso de transición a operaciones industriales para la biodegradación y biotransformación de plásticos, principalmente el PET. Empresas dedicadas a la investigación e innovación de enzimas como Carbios, BASF, o Novozymes pueden generar alianzas estratégicas importantes en la transformación de los procesos de tratamiento de residuos plásticos a métodos sostenibles que transiten a la economía circular vinculada a la Agenda 2030 y ODS de la ONU. Estos pueden acarrear oportunidades en el mercado latinoamericano y en Colombia debido a que no se han desplegado numerosas empresas vinculadas a estos procesos, no obstante, estas tecnologías son disruptivas lo que genera incertidumbre ante el posicionamiento de la biodegradación de plásticos debido a su disposición y tratamiento tradicional en el país y la región.

La empresa floricultora Jardines de los Andes, puede optar por la revisión de los microorganismos degradadores de plástico presentes en su ecosistema, y aprovechar el desarrollo de procesos biotecnológicos sostenibles en alianza con la UNAD CCAV Facatativá, y así ser pioneros en estos procesos a escala piloto en el país.

Referencias

- Acero, E. H., Ribitsch, D., Steinkellner, G., Gruber, K., Greimel, K., Eiteljoerg, I., Trotscha, E., Wei, R., Zimmermann, W., Zinn, M., Cavaco-Paulo, A., Freddi, G., Schwab, H., & Guebitz, G. (2011). Enzymatic surface hydrolysis of PET: Effect of structural diversity on kinetic properties of cutinases from *Thermobifida*. *Macromolecules*, *44*, 4632–4640.
- Acofarma. (2022). Fichas de Información Técnica-Tween. In *Acofarma* (pp. 1–3).
- Alliance to End Plastic Waste. (2023). *We are working together to end plastic waste*.
- Amaral-Zettler, L. A., Zettler, E. R., & Mincer, T. J. (2020). Ecology of the plastisphere. In *Nature Reviews Microbiology* (Vol. 18, Issue 3, pp. 139–151). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0308-0>
- Anca M., S., & Robbert, K. (2003). *Minicell-based bioremediation* (Patent 2003/0219888A1).
- Araujo Cantillo, L. S., Bermúdez Lezano, R. M., Carrillo Parejo, M. T., Castillo Tovar, M. J., Rodríguez Guerrero, V., & Roncallo Pirela, C. D. (2020). El Alcance de la Regulación Colombiana dirigida a la Producción, Manejo y Gestión Adecuada de Residuos de los Productos Plásticos. In *Retos del Derecho frente al Desarrollo Sostenible y la Responsabilidad Social Empresarial en Colombia en el siglo XXI* (pp. 157–171).
- Asociación Nacional de Recicladores. (2023). *Una huella recicladora*. ANR.
- Atiwesh, G., Mikhael, A., Parrish, C. C., Banoub, J., & Le, T.-A. T. (2021). *Environmental impact of bioplastic use: A review*.

- Baldera-Moreno, Y., Pino, V., Farres, A., Banerjee, A., Godillo, F., & Andler, R. (2022). Biotechnological Aspects and Mathematical Modeling of the Biodegradation of Plastics under Controlled Conditions. *Polymers*, *14*(3).
- Barros, J., & Seena, S. (2021). Plastisphere in freshwaters: An emerging concern. *Environmental Pollution*, *290*, 118123.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118123>
- BCC Publishing Staff. (2023). *Microbial products: Technologies, Applications and Global Markets*.
- Bergeson, A. R., Silvera, A. J., & Alper, H. S. (2024). Bottlenecks in biobased approaches to plastic degradation. *Nature Communications*, *15*.
- Biakhmetov, B., Dostiyarov, A., Ok, Y. S., & You, S. (2023). A review on catalytic pyrolysis of municipal plastic waste. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* (Vol. 12, Issue 6). John Wiley and Sons Ltd.
<https://doi.org/10.1002/wene.495>
- Bohorquez Roncancio, L. N. (2024, April 25). Prohíben la producción de plásticos de un solo uso en Colombia. *El Tiempo*.
- Brandon, A. M., Garcia, A. M., Khlystov, N. A., Wu, W.-M., & Criddle, C. S. (2021). Enhanced Bioavailability and Microbial Biodegradation of Polystyrene in an Enrichment Derived from the Gut Microbiome of *Tenebrio molitor* (Mealworm Larvae). *Environmental Science & Technology*, *55*(3), 2027–2036.
- Break Free From Plastic. (2023). *The global movement envisioning a future free from plastic pollution*.
- Carballo, M., Gallardo, M. del C., & Murillo, M. (2023). Analysis of a cement-treated base with the addition of recycled PET fibers. *Revista Infraestructura Vial*, *25*(44).

Carbios. (2022). *Carbios' biotechnologies recognized by consumers as the most promising solutions helping to solve the plastic pollution issue.*

CARBIOS. (2022). *Sustainability Report.*

CARBIOS. (2023, September 28). Carbios announces half-year 2023 financial results and corporate update. *CARBIOS.*

CARBIOS. (2024a, May 30). L'OCCITANE en Provence and CARBIOS present a PET bottle made from enzymatic recycling, the result of a European circular economy. *CARBIOS.*

CARBIOS. (2024b, June 27). CARBIOS and Zhink Group enter official discussions for long-term partnership to build PET biorecycling industrial capacities in China. *CARBIOS.*

Carstens, L., Cowan, A. R., Seiwert, B., & Schlosser, D. (2020). Biotransformation of Phthalate Plasticizers and Bisphenol A by Marine-Derived, Freshwater, and Terrestrial Fungi. *Sec. Microbiotechnology, 11.*

Chen, S., Tong, X., Woodard, R. W., Du, G., Wu, J., & Chen, J. (2008). Identification and Characterization of Bacterial Cutinase**S. J Biol Chem, 283(38), 25854–25862.*

Chr. Hansen. (2024). *CHR. HANSEN.*

CHR HANSEN. (2024). *CHR Hansen Colombia S.A.S.*

Circulate Capital. (2024). *Circulate Capital.*

Corporación Emacin, & Duraflon. (2012). Polietileno-HDPE. In *Ficha técnica.*
Corporación Emacin.

Cudjoe, D., & Wang, H. (2022). Plasma gasification versus incineration of plastic waste: Energy, economic and environmental analysis. *Fuel Processing Technology, 237,* 107470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107470>

- Danso, D., Chow, J., & Streit, W. R. (2019). Plastics: Environmental and Biotechnological Perspectives on Microbial Degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(19).
- Danso, D., Schmeisser, C., Chow, J., Zimmerman, W., Wei, R., Leggewei, C., Li, X., Hazen, T., & Streit, W. R. (2018). New Insights into the Function and Global Distribution of Polyethylene Terephthalate (PET)-Degrading Bacteria and Enzymes in Marine and Terrestrial Metagenomes. *Applied and Environmental Microbiology*, 4(84).
- Danso, D., Schmeisser, C., Chow, J., Zimmerman, W., Wei, R., Leggewie, C., Li, X., Hazen, T., & Streit, W. R. (2018). New Insights into the Function and Global Distribution of Polyethylene Terephthalate (PET)-Degrading Bacteria and Enzymes in Marine and Terrestrial Metagenomes. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(8).
- De Weerd, L., Sasao, T., Compennolle, T., Van Passel, S., & De Jaeger, S. (2020). The effect of waste incineration taxation on industrial plastic waste generation: A panel analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104717. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104717>
- DeCastro, M. E., Rodríguez-Belmonte, E., & González-Siso, M.-I. (2016). Metagenomics of Thermophiles with a Focus on Discovery of Novel Thermozyms. *Frontiers in Microbiology*, 7.
- Dhaka, V., Singh, S., Anil, A. G., Sunil Kumar Naik, T. S., Garg, S., Samuel, J., Kumar, M., Ramamurthy, P. C., & Singh, J. (2022). Occurrence, toxicity and remediation of polyethylene terephthalate plastics. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(3), 1777–1800. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01384-8>

- Díaz Suárez, I. K., & Romero Lasprilla, I. J. (2021). *Comparación de la capacidad de degradación de cloruro de polivinilo de 8 hongos aislados de un suelo contaminado con resina de PVC*. Universidad Libre.
- Downey, L. (2022). *Buy: What it Means, Consumer Versus Business, Types*.
- Dresler, K., van den Heuvel, J., Müller, R.-J., & Deckwer, W.-D. (2006). Production of a recombinant polyester-cleaving hydrolase from *Thermobifida fusca* in *Escherichia coli*. *Bioprocess Biosyst Eng.*, 29(3), 169–183.
- Ellen Macarthur Foundation. (2023). *Unlocking a reuse revolution: scaling returnable packaging*.
- EMAC. (2012). Ficha técnica PVC. In *Ficha técnica*. EMAC.
- EPDA. (2011). Ficha técnica PET. In *Ficha Técnica*. European Plastics Distributors Association.
- European Patent Office. (2024). *CPC-C12P*.
- European Patent Office. (2019). *Classification coopérative des brevets (CPC)*.
- European Patent Office. (2022). *CPC-C08J*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities. In *State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities*. FAO.
<https://doi.org/10.4060/cb1928en>
- Fundación Bahía y Ecosistemas de Colombia. (2023). *Mar limpio: Guardianes de Océanos*.
- Fundación Malpelo. (2024). *Fundación Malpelo*.

- Giacomucci, L., Raddadi, N., Soccio, M., Lotti, N., & Fava, F. (2019). Polyvinyl chloride biodegradation by *Pseudomonas citronellolis* and *Bacillus flexus*. *New Biotechnology*, 52, 35–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.04.005>
- Government of Canada. (2024). *Single-use Plastics Prohibition Regulations - Overview*. Government of Canada.
- Greifenstein, M., White, D. W., Stubner, A., Hout, J., & Whelton, A. J. (2013). Impact of temperature and storage duration on the chemical and odor quality of military packaged water in polyethylene terephthalate bottles. *Science of The Total Environment*, 456–457, 376–383. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.092>
- Grover, A., Gupta, A., Chandra, S., Kumari, A., & Khurana, S. P. (2015). Polythene and environment. *International Journal of Environmental Sciences*, 5(6).
- Gunnars, K. (2023). *What Do Stock Analyst Ratings Mean? Buy, Sell, Hold, and More*.
- Haiwei, L., & Ann, M. M. (2014). Evolutionary Ecology of the Marine Roseobacter Clade. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 78(4), 573–587. <https://doi.org/10.1128/mnbr.00020-14>
- Hu, X., Thumarat, U., Zhang, X., Tang, M., & Kawai, F. (2010). Diversity of polyester-degrading bacteria in compost and molecular analysis of a thermoactive esterase from *Thermobifida alba* AHK119. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87(2).
- Hussain, N., Jaitley, V., & Florence, A. T. (2001). Recent advances in the understanding of uptake of microparticulates across the gastrointestinal lymphatics. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 50(1), 107–142. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(01\)00152-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-409X(01)00152-1)
- Infront. (2024). *Ratios valuation of Carbios SA (ALCRB / FRA)*.

- Instituto de Capacitación e Innovación del Plástico y del Caucho. (2024). *Instituto de Capacitación e Innovación del Plástico y del Caucho*. ICIPC.
- Irfan, S., Mohammed, A., & Alatawi, M. (2019). Aquatic Ecosystem and Biodiversity: A Review. *Open Journal of Ecology*, 9(1).
- James, G. (2019). *The plastics landscape: regulations, policies and influencers*.
<https://www.unpri.org/download?ac=9630>
- Jaso Sánchez, M. A., & Goycochea Pineda, Y. E. (2023). Caracterización de Organizaciones Ambientalistas como Actores Clave en la Transición Sustentable a una Economía Circular del Plástico. *UPIISCA Investigación Interdisciplinar*, 9(1), 14–29.
- Jiyoon, S., Changduk, K., Joonsong, P., Sungsoo, K., Youngkyoung, P., Sunghaeng, L., Soyoun, L., Juyoung, L., Kwangmyung, C., & Wooyong, L. (2017). *Genetically engineered yeast cell producing lactate including acetaldehyde dehydrogenase, method of producing yeast cell, and method of producing lactate using the same* (Patent 9617569).
- Jones, M. (1997). *Procesamiento de plásticos* (LIMUSA, Ed.; Vol. 1).
- Kankanige, D., & Babel, S. (2020). Smaller-sized micro-plastics (MPs) contamination in single-use PET-bottled water in Thailand. *Science of The Total Environment*, 717, 137232. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137232>
- Kawai, F., Kawabata, T., & Oda, M. (2019). Current knowledge on enzymatic PET degradation and its possible application to waste stream management and other fields. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(11).
- Kawai, F., Oda, M., Tamashiro, T., Waku, T., Tanaka, N., Yamamoto, M., Mizushima, H., Miyakawa, T., & Tanokura, M. (2014). A novel Ca²⁺-activated, thermostabilized

- polyesterase capable of hydrolyzing polyethylene terephthalate from *Saccharomonospora viridis* AHK190. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98, 10053–10064.
- Kettner, M. T., Oberbeckmann, S., Labrenz, M., & Grossart, H.-P. (2019). The Eukaryotic Life on Microplastics in Brackish Ecosystems. *Frontiers in Biology*, 10(415067).
- Khan, S., Ali, S., & Ali, A. (2022). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by mesophilic fungus ‘*Penicillium citrinum*’ isolated from soils of plastic waste dump yard, Bhopal, India. *Environmental Technology*, 44(15), 2300–2314.
- Krueger, M. C., Harms, H., & Schlosser, D. (2015). Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 8857–8874.
- Lew, K. (2019). *Taxonomy: The Classification of Biological Organisms* (Enslow Publishing, Vol. 1). New York.
- Ley 2232 de 2022, Pub. L. No. 2232, Congreso de la República de Colombia (2022).
- Lin, X., Zhang, S., Yang, S., Zhang, R., Shi, X., & Song, L. (2023). A landfill serves as a critical source of microplastic pollution and harbors diverse plastic biodegradation microbial species and enzymes: Study in large-scale landfills, China. *Journal of Hazardous Materials*, 457, 131676.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131676>
- Liu, J., Xu, G., Dong, W., Xu, N., Xin, F., Ma, J., Fang, Y., Zhou, J., & Jiang, M. (2018). Biodegradation of diethyl terephthalate and polyethylene terephthalate by a novel identified degrader *Delftia* sp. WL-3 and its proposed metabolic pathway. *Applied Microbiology*, 67.

- López, N. I., Pettinari, M. J., Stackebrandt, E., & Tribelli, P. M. (2019). Microbial diversity in Amazonian ecosystems and its potential for biodegradation of synthetic polymers. *Frontiers in Microbiology, 10*.
- Melchor-Martínez, E. M., Macías-Garbett, R., Alvarado-Ramírez, L., Araújo, R. G., Sosa-Hernández, J. E., Ramírez-Gamboa, D., Parra-Arroyo, L., Alvarez, A. G., Monteverde, R. P. B., Cazares, K. A. S., Reyes-Mayer, A., Lino, M. Y., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldívar, R. (2022). Towards a Circular Economy of Plastics: An Evaluation of the Systematic Transition to a New Generation of Bioplastics. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14061203>
- Metzger, A. (1976). Polyethylene terephthalate and the pillarTM palatal implant: its historical usage and durability in medical applications. *Biomedical Engineering, 11*(9).
- Meyer-Cifuentes, I. E., Werner, J., Jehmlich, N., Will, S. E., Neumann-Schaal, M., & Öztürk, B. (2020). Synergistic biodegradation of aromatic-aliphatic copolyester plastic by a marine microbial consortium. *Nature Communications, 11*(1).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Plan Nacional para la Gestión Sostenible de los Plásticos de un solo uso*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Colombia aspira que en el 2030 el 100% de los plásticos de un solo uso del mercado sean reutilizables o compostables*. MinAmbiente.
- Miri, S., Saini, R., Davoodi, S. M., Pulicharla, R., Brar, S. K., & Magdouli, S. (2022). Biodegradation of microplastics: Better late than never. *Chemosphere, 286*, 131670. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131670>

- Mulder, K., & Knot, M. (2001). PVC plastic: a history of systems development and entrenchment. *Technology in Society*, 23(2), 265–286.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0160-791X\(01\)00013-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0160-791X(01)00013-6)
- Muthukrishnan, T., Al Khaburi, M., & Abed, M. (2019). Fouling microbial communities on plastics compared with wood and steel: are they substrate- or location-specific? *Microbial Ecology*, 78, 361–374.
- National Cancer Institute (NIH). (2022). *Sobreexpresar*.
- National Center for Biotechnology Information. (2023). PubChem Compound Summary for CID 6338, Vinyl Chloride. In *Retrieved*. NCBI.
- Naumova, N. B., & Kabilov, M. R. (2022). About the Biodiversity of the Air Microbiome. *Acta Naturae*, 14(4), 50–56.
- Nisticò, R. (2020). Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. *Polymer Testing*, 90, 106707.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106707>
- NSF. (2024). *Aquatic Microbes*.
- Onchonga-Nyakundi, D., Onyonka-Mogosu, E., & Nahum-Kimaro, D. (2023). Genetic engineering approach to address microplastic environmental pollution: a review. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 18(4), 179–188.
- Ortiz-Ocampo, G. I., Jiménez, D. J., & Zambrano, M. M. (2020). Plastic biodegradation by marine bacteria isolated from the Colombian Caribbean Sea. *Marine Biotechnology*, 22(4), 546–556.
- Parales, R. E., Bruce, N. C., Schmid, A., & Wackett, L. P. (2002). Biodegradation, Biotransformation, and Biocatalysis (B3). *Applied and Environmental*

- Microbiology*, 68(10), 4699–4709. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.10.4699-4709.2002>
- Pardo-Rodriguez, M. L., & Zorro-Mateus, P. J. P. (2021). Biodegradation of polyvinyl chloride by *Mucor* s.p. and *Penicillium* s.p. isolated from soil. *Investigación, Desarrollo e Investigación*, 11(2).
- Parques Nacionales Naturales. (2022). “Un solo uso, muchos daños” iniciativa de Parques Nacionales Naturales para evitar plásticos de un solo uso en áreas protegidas. PNN.
- Patel, R. M. (2016). 2 - Polyethylene. In J. R. Wagner (Ed.), *Multilayer Flexible Packaging (Second Edition)* (pp. 17–34). William Andrew Publishing.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37100-1.00002-8>
- Patrick, S. (2005). *Practical guide to polyvinyl chloride*. iSmithers Rapra Publishing.
- Peng, Y., Wang, Y., Ke, L., Dai, L., Wu, Q., Cobb, K., Zeng, Y., Zou, R., Liu, Y., & Ruan, R. (2022). A review on catalytic pyrolysis of plastic wastes to high-value products. *Energy Conversion and Management*, 254, 115243.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115243>
- Polychronopoulos, N., & Vlachopoulos, J. (2023). On the origin of microplastics in bottle water. *AIP Conference Proceedings*, 2884(1).
- Quecholac-Piña, X., Hernández-Berriel, M. del C., Mañón-Salas, M. del C., Espinosa-Valdemar, R. M., & Vázquez-Morillas, A. (2021). Degradation of Plastics in Simulated Landfill Conditions. *Polímeros Naturales y Biodegradables*, 13(7).
- Ribitsch, D., Herrero Acero, E., Greimel, K., Dellacher, A., Zitzenbacher, S., Marold, A., Diaz Rodriguez, R., Steinkellner, G., Gruber, K., Schwab, H., & Guebitz, G. M.

- (2012). A New Esterase from Thermobifida halotolerans Hydrolyses Polyethylene Terephthalate (PET) and Polylactic Acid (PLA). *Polymers*, 4(1), 617–629.
- Rodríguez Vásquez, A. (2023). Estructura y recaudo de tributos sobre el consumo de plástico en Colombia, Perú y Ecuador: un análisis comparado. *Revista de Derecho Fiscal*, 22(1692–6722), 133–155.
- Ronca, S. (2017). Chapter 10 - Polyethylene. In M. Gilbert (Ed.), *Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)* (pp. 247–278). Butterworth-Heinemann.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00010-4>
- Rosato, A., Barone, M., Negroni, A., Brigidi, P., Fava, F., Xu, P., Candela, M., & Zanaroli, G. (2020). Microbial colonization of different microplastic types and biotransformation of sorbed PCBs by a marine anaerobic bacterial community. *Science of The Total Environment*, 705, 135790.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135790>
- Ru, J., Huo, Y., & Yang, Y. (2020). *Microbial Degradation and Valorization of Plastic Wastes. 11*.
- Ruggiero, M. A., Gordon, D. P., Orrell, T. M., Bailly, N., Bourgoïn, T., Brusca, R. C., Cavalier-Smith, T., Guiry, M. D., & Iglesia, P. M. (2015). A higher level classification of all living organisms. *Plos ONE*, 10(4).
- Saeed, S., Iqbal, A., & Deeba, F. (2022). Biodegradation study of Polyethylene and PVC using naturally occurring plastic degradation microbes. *Archives of Microbiology*, 204(8).
- Sánchez Gallo, E. G. (2015). *Estudio de factibilidad de una empresa de elaboración de pellets a partir de plástico reciclado*. Universidad Politécnica Salesiana.

- Singh Jadaun, J., Bansal, S., Sonthalia, A., Rai, A. K., & Singh, S. P. (2022). Biodegradation of plastics for sustainable environment. *Bioresource Technology*, 347, 126697. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126697>
- Singh, T. (2021). Generation of microplastics from the opening and closing of disposable plastic water bottles. *Water & Health*, 19(3), 488–498.
- Sorensen, R. M., Kanwar, R. S., & Jovanovi, B. (2023). Past, present, and possible future policies on plastic use in the United States, particularly microplastics and nanoplastics: A review. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19(2), 474–488.
- Stapleton, M. J., & Hai, F. I. (2023). *Microplastics as an emerging contaminant of concern to our environment: a brief overview of the sources and implications*. (14; 1).
- Tasman Research. (2024). *Plastic-Degrading Enzyme Market Size, Market Share and Global Market Analysis Report, 2023 - 2030*.
- Tennakoon, A., Wu, X., Paterson, A. L., Patnaik, S., Pei, Y., LaPointe, A. M., Ammal, S. C., Hackler, R. A., Heyden, A., Slowing, I. I., Coates, G. W., Delferro, M., Peters, B., Huang, W., Sadow, A. D., & Perras, F. A. (2020). Catalytic upcycling of high-density polyethylene via a processive mechanism. *Nature Catalysis*, 3(11), 893–901. <https://doi.org/10.1038/s41929-020-00519-4>
- The Commonwealth. (2024). *The Commonwealth*.
- Tiso, T., Narancic, T., Wei, R., Pollet, E., Beagan, N., Schröder, K., Honak, A., Jiang, M., Kenny, S. T., Wierckx, N., Perrin, R., Avérous, L., Zimmermann, W., O'Connor, K., & Blank, L. M. (2021). Towards bio-upcycling of polyethylene terephthalate. *Metabolic Engineering*, 66, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.03.011>
- UNCTAD. (2022). *Global Plastics Trade Hits Record \$1.2 trillion*.

- UNEA. (2024). *The United Nations Environment Assembly*.
- United Nations Environmental Programme. (2022). Draft resolution on an internationally legally binding instrument on plastic pollution. *UNEP*.
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/37395/UNEA5.2%20Global_Agreement_Explanatory%20note%20and%20Resolution%2027%20October.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- United Nations Environmental Programme. (2023). *The New Plastic Economy Global Commitment*. UNEP.
- Urbanek, A., Rymowicz, W., & Mironczuk, A. (2018). Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *102*(17), 7669–7678.
- Vahos Padilla, A. I., & Suárez Virviescas, L. C. (2022). *Los Créditos de Plástico como una Herramienta para Fortalecer el Aprovechamiento de los Plásticos en Colombia*. Universidad Externado de Colombia.
- Vásquez, B. R. (2020). *CAC 40*.
- Vivi, V. K., Martins-Franchetti, S. M., & Attili-Angelis, D. (2019). Biodegradation of PLC and PVC: *Chaetomium globosum* (ATCC 16021) activity. *Folia Microbiologica*, *64*, 1–7.
- Waste and Resources Action Programme. (2024). *Plastic bags and wrapping recycling local collection pilot*. WRAP.
- Wei, R., Oeser, T., Then, J., Kühn, N., Barth, M., Schmidt, J., & Zimmermann, W. (2014). Functional characterization and structural modeling of synthetic polyester-degrading hydrolases from *Thermomonospora curvata*. *AMB Express*, *4*(44).

- Xiang, Z., & You, F. (2020). Waste high-density polyethylene recycling process systems for mitigating plastic pollution through a sustainable design and synthesis paradigm. *AIChE Journal*, 67(4).
- Yadav, V., Sherly, M. A., Ranjan, P., Tinoco, R. O., Boldrin, A., Damgaard, A., & Laurent, A. (2020). Framework for quantifying environmental losses of plastics from landfills. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104914.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104914>
- Yang, Z., Lü, F., Zhang, H., Wang, W., Shao, L., Ye, J., & He, P. (2021). Is incineration the terminator of plastics and microplastics? *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123429. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123429>
- Yao, Z., Seong, H. J., & Jang, Y. S. (2022). Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (Vol. 242). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113933>
- Yoon, M. G., Jeong, H., & Kim, M. N. (2012). Biodegradation of Polyethylene by a Soil Bacterium and AlkB Cloned Recombinant Cell. *J. Bioremed Biodegrad*, 3(4), 1–8.
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196–1199.
- Yu, F., Wu, Z., Wang, J., Li, Y., Chu, R., Pei, Y., & Ma, J. (2022). Effect of landfill age on the physical and chemical characteristics of waste plastics/microplastics in a waste landfill sites. *Environmental Pollution*, 306, 119366.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119366>
- Zahid, H., Afzal, N., Arif, M. M., Zahid, M., Nawab, S., Qasim, M. M., Alvi, F. N., Nazir, S., Perveen, I., Abbas, N., Saleem, Y., Mazhar, S., Nawaz, S., Faridi, T. A., Awan,

- H. M. A., Syed, Q., & Abidi, S. H. I. (2024). Microorganism-mediated biodegradation for effective management and/or removal of micro-plastics from the environment: a comprehensive review. *Archives of Microbiology*, 206(4), 198.
<https://doi.org/10.1007/s00203-024-03904-w>
- Zapata Bravo, Á., Viera Escobar, V., Zapata Domínguez, Á., & Rodríguez Ramírez, A. (2021). The Circular Economy of PET bottles in Colombia. *Cuadernos de Administración*, 37(70).
- Zhang, Y., Pedersen, J. N., Eser, B. E., & Guo, Z. (2022). Biodegradation of polyethylene and polystyrene: From microbial deterioration to enzyme discovery. *Biotechnology Advances*, 60, 107991.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107991>
- Zhou, X.-L., He, P.-J., Peng, W., Yi, S.-X., Lü, F., Shao, L.-M., & Zhang, H. (2022). Upcycling waste polyvinyl chloride: One-pot synthesis of valuable carbon materials and pipeline-quality syngas via pyrolysis in a closed reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 427, 128210.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128210>
- Zúñiga Enríquez, G. (2021). *Impacto de las Acciones de Control, Fiscalización e Impuesto al Consumo en el Uso de Bolsas de Plástico, Latinoamérica, 2019-2021*.
Universidad Católica de Santa María.