

AVANCES EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL: BIORREMEDIACIÓN DE PLÁSTICOS.

**ADVANCES IN ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY:
BIOREMEDIATION OF PLASTICS.**

YENNY DEL PILAR CASAS-MARTÍNEZ

Estudiante de Ingeniería Ambiental
Universidad de Boyacá, Colombia
ydcasas@uniboyaca.edu.co

LEIDY TATIANA FUQUEN-FÚQUENE

Estudiante de Ingeniería Ambiental
Universidad de Boyacá, Colombia
lrfuquen@uniboyaca.edu.co

DIANA LORENA RAMÍREZ-TORRES

Estudiante de Ingeniería Ambiental
Universidad de Boyacá, Colombia
dialorramirez@uniboyaca.edu.co

ALIDA MARCELA GÓMEZ-RODRÍGUEZ

Docente Ingeniería Ambiental
Grupo de Investigación Núcleo
Universidad de Boyacá, Colombia
aligomez@uniboyaca.edu.co

Recibido: 20/06/2019

Aceptado: 21/01/2020



RESUMEN

El plástico es la tercera aplicación del petróleo más usada en el mundo: al año se consumen 200 millones de toneladas. Proviene de una fuente no renovable, es contaminante y hasta ahora se está empezando a incursionar en su nivel de biodegradabilidad. Debido a su difícil degradación y su extensivo uso, se han vuelto un serio problema ambiental a nivel mundial: la existencia de residuos plásticos en el medio ambiente es más que un problema estético, pues representa un peligro para los organismos que sufren daños y hasta la muerte por ingestión y atragantamiento. En la actualidad es difícil prescindir de estos materiales, no solo por su utilidad, sino también por la importancia económica que tienen. El desarrollo de la biotecnología permite avanzar en procesos de biorremediación utilizando microorganismos con capacidad para mejorar la biodegradación natural de los plásticos y generar resultados positivos para el medio ambiente y oportunidades de negocio en el sector dedicado a la recuperación de residuos. Así mismo, la biotecnología ha logrado avanzar en la producción de bioplásticos, que consiste en conseguir polímeros naturales a partir de residuos agrícolas, celulosa o almidón de patata o maíz. Son 100 % degradables, igual de resistentes y versátiles que los convencionales. El presente artículo de revisión presenta una visión general sobre los plásticos, sus propiedades, estrategias convencionales de remoción, nuevas estrategias de biorremediación y producción de algunos tipos de bioplásticos.

Palabras clave: biorremediación, degradabilidad, microorganismos, contaminación.

ABSTRACT

Plastic is the third most used oil application in the world, and 200 million tons are consumed on the planet each year. The source of a non-renewable source is polluting and, until now, it is beginning to dabble on the level of biodegradability that each type of plastic can have, which causes excessive pressure on limited non-renewable energy sources. The problems are very good and better in the world, in addition, the existence of waste in the environment is more than an aesthetic problem, because it represents a danger for organisms that suffer damage by ingestion, choking and even death. Nowadays it is difficult to dispense with these materials, not only for their usefulness but also for the economic

Citar este artículo así: Casas Y., Fuquen L., Ramírez D., Gómez A., Avances en biotecnología ambiental: biorremediación de plásticos. Revista I3+, 4(2), 89 - 114 p.p

importance they have. The development of biotechnology allows to advance in the processes of bioremediation of microorganisms with the ability to improve the natural biodegradation of plastics generating positive results for the environment and business opportunities in the sector dedicated to waste recovery. Likewise, biotechnology has made progress in the production of bioplastics, as a viable option, that is, in a company of bioplastics, cellulose or potato or corn starch, they are 100% degradable, just as true and versatile as the conventional ones. present article of the review presents an overview on plastics, showing their properties, removal strategies, new bioremediation strategies and production of some types of bioplastics.

Keywords: Bioremediation, degradability, microorganisms, contamination

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población y el desarrollo industrial sin precedentes durante el siglo XX y XXI han elevado la presencia de contaminantes sólidos y líquidos convencionales a niveles críticos. La consecuencia ha sido la aparición de problemas de contaminación que antes se desconocían y para los cuales la sociedad no estaba preparada (Rizo y Montealegre, 2015). Una de estas problemáticas es la gran cantidad de plásticos que son desechados al medio ambiente y que contaminan y alteran su habitual funcionamiento.

El plástico es cualquier material formado principalmente por algún polímero natural o sintético al que se le agregan aditivos que le añaden ciertas características como flexibilidad, liviandad y demás (Castells y Jurado, 2009). Este material es derivado del petróleo, aunque algunos se pueden obtener a partir de otras sustancias naturales, debido a que se producen directamente con materias primas vegetales (celulosa, látex) o animales (caseína, que es una de las principales proteínas de la leche de vaca) mediante reacciones enzimáticas (Segura et al., 2007). Estos se denominan biopolímeros que son verdaderamente biodegradables en condiciones controladas, y se clasifican en biodegradables, compostables, oxodegradables, fotodegradables, solubles en agua y biodesintegrables (Plastivida, 2007).

Puesto que una diferencia importante entre los plásticos obtenidos a partir de polímeros naturales y los de origen sintético es su degradabilidad, se ha corroborado que ambos son susceptibles de degradación por sistemas biológicos, ya que han estado presentes en el ambiente desde hace mucho tiempo. Entonces, así como han evolucionado organismos capaces de producirlos, también lo han hecho organismos con capacidad para aprovecharlos y degradarlos para obtener energía y nutrientes (Segura et al., 2007).

Uno de los grandes problemas a los que se enfrenta actualmente la sociedad es que el plástico sintético tarda muchos años en degradarse. Por eso es obligatorio empezar a producir plásticos usando la biotecnología, para que estos sean biodegradables y no afecten en mayor medida el ambiente. En ese sentido, la biorremediación se ha convertido en una alternativa atractiva y prometedora entre las tradicionales técnicas fisicoquímicas para la remediación de los compuestos que contaminan el ambiente. Es muy prometedor usar esta técnica para reducir un poco los niveles de contaminación que se están presentando por este tipo de residuos (Garzón et al., 2017).

PROPIEDADES O CARACTERÍSTICAS DE LOS PLÁSTICOS

El plástico es un material realizado con resinas (polímeros) sintéticas derivadas del petróleo y, para su fabricación, la industria petroquímica suministra los monómeros junto con diversos tipos de aditivos que modifican sus propiedades: flexibles, duraderos, livianos, versátiles, no se oxidan y son de bajo costo (Observatorio Educación y Trabajo, 2015). Están conformados por largas cadenas macromoleculares que contienen en su estructura carbono e hidrógeno. Dependiendo de la estructura que forma el carbono al asociarse con hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, cambian las propiedades físicas y su estructura molecular. Estos se dividen en termoplásticos, materiales que se ablandan al ser calentados y se endurecen al enfriarse, y termoestables, que adoptan una forma permanente al aplicarles calor y presión (Chunga y Cieza, 2017).

LOS TERMOPLÁSTICOS

Se caracterizan por estar compuestos de moléculas lineales con pocos o ningún enlace cruzado, que se reblandecen al calentarse y fluyen; al enfriarse, vuelven a ser sólidos nuevamente (Cristán et al., 2003). Estructuralmente, son plásticos en los que sus moléculas son cadenas largas y lineales, con poco o ningún entrecruzamiento. Por esta razón, este tipo de materiales no tienen un punto de fusión definido, sino que pasan por distintos grados de dureza y fluidez, son compuestos amorfos y cuentan con una cristalinidad baja. A este grupo pertenecen los plásticos comerciales más importantes en la actualidad, como polietileno, polipropileno, nylon, poliestireno y policloruro de vinilo (López, 2008).

Las propiedades generales de algunos termoplásticos, referentes a la manufactura, son:

- Los acetales: compuestos de acético y alcohol. Tienen buena resistencia, buena rigidez y resistencia a la abrasión, la humedad, el calor y los productos químicos.
- Los acrílicos: poseen una resistencia moderada, buenas propiedades ópticas y resistencia al interperismo. Además, cuentan con una buena resistencia eléctrica.
- Los celulósicos: tienen una amplia gama de propiedades mecánicas. Dependiendo de su composición, se pueden hacer rígidos, fuertes y tenaces, aunque no resisten el interperismo y son afectados por el calor.

- Las poliamidas están disponibles en dos tipos principales: nylon, que tienen buenas propiedades mecánicas, son autolubricantes y resistentes a la mayor parte de los productos químicos; y las aramidas (poliamidas aromáticas) que tienen una muy elevada resistencia a la tensión y la rigidez.
- Los poliésteres: tienen buenas propiedades mecánicas, eléctricas y químicas, además de buena resistencia a la abrasión y son de baja fricción. Los polipropilenos cuentan con buenas propiedades mecánicas, eléctricas y químicas y buena resistencia al desgarramiento (Kalpakjian y Schmid, 2002)

LOS TERMOESTABLES

Cuando las moléculas de cadena larga en un polímero están entrelazadas en una organización tridimensional, la estructura se convierte en una molécula gigantesca con fuertes enlaces covalentes. Durante el proceso de polimerización se lleva a cabo el entrelazamiento de las cadenas, que es un proceso irreversible (Kalpakjian y Schmid, 2002). Este tipo de plásticos necesitan un agente externo (catalizador) para cambiar su estructura a otra diferente; una vez producida, esta no puede volver a su estado original, como ya se mencionó anteriormente. Además, poseen mejores propiedades mecánicas, térmicas y químicas, resistencia eléctrica y estabilidad dimensional que los termoplásticos (Gil, 2012).

Las características generales de los principales plásticos termoestables son:

- Los alquilo: poseen buenas propiedades aislantes eléctricas, resistencia al impacto y estabilidad dimensional.
- Los aminos: tienen propiedades que dependen de su composición. En general, son duros y rígidos y son resistentes a la abrasión.
- Los fenoles: cuentan con una elevada resistencia al calor, al agua, a la electricidad y a los productos químicos.
- Los poliésteres: tienen buenas propiedades mecánicas, químicas y eléctricas. Por lo general, este tipo de plásticos se utilizan reforzados con fibras de vidrio.
- Las poliamidas: poseen buenas propiedades mecánicas, físicas y eléctricas a temperaturas elevadas.
- Las siliconas: generalmente resisten bien a la intemperie, poseen excelentes propiedades eléctricas y resisten los productos químicos y el calor (Kalpakjian y Schmid, 2002).

FORMAS EN QUE SE ENCUENTRA EL PLÁSTICO EN LA NATURALEZA

Los plásticos son sustancias orgánicas de alto peso molecular que se crean generalmente a partir de compuestos de bajo peso molecular. Los plásticos se pueden obtener por transformación de productos naturales que provienen directamente de materias primas vegetales por modificación química (en especial la celulosa, el celofán o el látex). A esos tipos de plásticos son a los que se les puede llamar biodegradables. Sin embargo, la otra forma de encontrar el plástico es sintética o artificial, que se elabora a partir de compuestos derivados del petróleo, el gas natural o el carbón. La mayoría de los

compuestos denominados plásticos son polímeros sintetizados a partir de compuestos orgánicos (Cristán et al., 2003).

Una de las desventajas que tienen estos materiales es que, al ser materiales artificiales, no existen mecanismos en la naturaleza para su rápida degradación, lo cual constituye una importante desventaja a la hora de su disposición final (Castellón, 2010).

TIPOS DE PLÁSTICOS

Los códigos de identificación de las resinas del plástico se conocen con los símbolos que se observan en la figura 1. Estos símbolos desarrollados en 1988 por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI por sus siglas en inglés) identifican el contenido de resina del recipiente en el que se han colocado los símbolos (MAVDT, 2004).



Figura 1. Símbolos para identificación de los plásticos.

PET (POLIETILENO TEREFTALATO)

El PET es un material caracterizado por su gran ligereza y resistencia mecánica a la compresión, alto grado de transparencia y brillo, y conservación del sabor y el aroma de los alimentos. Además, se considera como una barrera contra los gases y puede ser reciclable en un 100 % (Luis et al., 2008). El PET es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo y tiene forma de poliéster aromático. Por ende, su denominación técnica es polietilén tereftalato o politereftalato de etileno.

Este plástico empezó a ser utilizado como materia prima en fibras para la industria textil y la producción de filmes (López, 2008).

El PET es producido a partir de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET está compuesto por 64 % de petróleo, 23 % de derivados líquidos del gas natural y 13 % de aire. A partir del petróleo crudo se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico (Luis et al., 2008).

PEAD (POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD)

Es una poliolefina muy utilizada en la industria del empaque flexible y en la de moldeo por inyección. Presenta una buena barrera para la humedad y su resistencia al impacto y a la tensión son también bastante aceptables (Guerrero et al., 2003). Se produce a partir del etileno derivado del petróleo o gas natural; luego se somete a un proceso de polimerización en un reactor en presencia de un catalizador, en condiciones de presión y temperatura que posibilitan la formación de polímeros, que en el producto final tienen la forma de gránulos (MAVDT, 2004).

Este polímero presenta fácil procesamiento y buena resistencia al impacto y a la abrasión. Es resistente a las bajas temperaturas, tiene alta resistencia a la tensión, compresión y tracción, pero no resiste a fuertes agentes oxidantes como ácido nítrico o ácido sulfúrico. Es impermeable y cuenta con una baja reactividad; no es tóxico y sus principales aplicaciones son envases para detergentes, aceites de automotor, lácteos, bolsas para supermercados, envases para pintura, helados, aceites, tuberías para gas, telefonía, agua potable, minería, láminas de drenaje y uso sanitario (Ochoa, 2017).

PVC (POLICLORURO DE VINILO)

En su composición están presentes tres elementos naturales: carbono e hidrógeno en forma de etileno, derivado del petróleo o gas, y cloro, obtenido a partir de la sal común. Mediante la combinación del etileno y el cloro se obtiene el monómero cloruro de vinilo, que a su vez se polimeriza mediante procesos de suspensión, emulsión o masa, para obtener como resultado el PVC en su estado de resina virgen (MAVDT, 2004). Por sí solo es el más inestable de los termoplásticos, pero con aditivos es el más

versátil y puede ser sometido a variados procesos para su transformación, lo que le ha hecho ocupar, por su consumo, el segundo lugar mundial detrás del polietileno. Estructuralmente, es un polímero vinílico (QuimiNet, 2010).

Además de sus buenas propiedades físicas, este tipo de plástico tiene alta resistencia química, resistencia a la humedad y buenas propiedades eléctricas; tiene alta resistencia mecánica, posee una excelente inercia química y su costo es bajo. También suele utilizarse en el aislamiento de cables, capas, bolsas de sangre, tubería médica, entre otros (Ochoa, 2017).

PEBD / (POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD)

Es un polímero que pertenece a la familia de los polímeros olefínicos, es decir que se deriva de la polimerización de las olefinas. Como su nombre lo indica, el polietileno está conformado por repetidas unidades de etileno. Se le considera un polímero de adición y su proceso de polimerización suele realizarse bajo presiones de 1.500 a 2.000 kg/cm². La estructura del PEBD es de cadenas muy ramificadas. Esta característica hace que su densidad sea más baja en comparación con el polietileno de alta densidad (QuimiNet, 2012).

No posee tan buenas propiedades mecánicas como el PEAD, pero presenta gran demanda para ser utilizado en películas flexibles y relativamente transparentes. Tiene un bajo punto de fusión, es fácil de procesar, resistente a la humedad, flexible, fácil de sellar y tiene bajo costo. Típicamente, el PEBD es usado en la manufactura de películas flexibles, como bolsas plásticas y publicitarias, bolsas para alimentos congelados y bolsas para dulces; también es usado en la manufactura de tapas flexibles, y además en alambres y cables por sus buenas propiedades de aislamiento eléctrico (Ochoa, 2017).

Los usos más comunes de este tipo de plástico son botellas, envases, juguetes, cascos, envases de cosméticos y alimentos y todo tipo de objetos domésticos (Aristegui Maquinaria, 2015). También se usa para la producción de bolsas plásticas, películas para invernaderos y usos agrícolas, fabricación de utensilios desechables como platos, vasos y cubiertos, botellas retornables, recubrimiento y aislamiento de cables, sacos de plástico y películas estirables para procesos de empaque y embalaje (QuimiNet, 2012).

PP (POLIPROPILENO)

Es un polímero termoplástico, parcialmente cristalino, tiene gran resistencia contra diversos solventes químicos, así como contra álcalis y ácidos. Su temperatura de reblandecimiento es más alta, y es más resistente a altas y a bajas temperaturas; principalmente, se moldea por inyección y se utiliza en la fabricación de juguetes, parachoques de automóviles, etc. Además, es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipos de laboratorio, componentes automotrices y películas transparentes (Ochoa, 2017). Igualmente, es una buena barrera contra el vapor

de agua y se emplea en forma de fibra para fabricar alfombras y sogas. Conjuntamente se emplea en gran variedad de usos domésticos (Cristán et al., 2003).

PS (POLIESTIRENO)

Es el polímero resultante de la síntesis orgánica entre el etileno y el benceno (hidrocarburos derivados del petróleo) para formar el monómero del estireno que se polimeriza a poliestireno. Los tipos principales de PS son el poliestireno de uso general y el poliestireno de alto impacto (MAVDT, 2004).

El PS es un producto químico peligroso y nocivo, compuesto por el benceno y el estireno, que por sus características ligeras, económicas y fáciles de transportar se ha convertido en uno de los plásticos más utilizados tanto en actividades sociales (vasos, platos, cubiertos desechables de icopor, como el que se muestra en la figura 8) como por las industrias como protectores de artefactos, debido a sus excelentes cualidades para la protección contra impactos y aislamiento térmico. Estos plásticos son vertidos en los botaderos sin ningún tratamiento previo y, como consecuencia, se dispersan y perduran en el tiempo, generando impactos ambientales por su difícil degradación (Téllez, 2012).

OTROS PLÁSTICOS

Son los productos hechos de otras resinas de plástico que no fueron mencionados anteriormente, o aquellos hechos de una combinación de plásticos. Los más conocidos son el ABS (Acrilonitrilo, Butadieno, Estireno), que se usa en automoción, en la industria y domésticamente; el PC (policarbonato), usado ampliamente en la manufactura moderna; la poliamida (PA), el nylon y los acetatos (POM), entre otros. Dependiendo de la resina o la combinación de resinas se usa frecuentemente para fabricar botellas de agua reutilizables, algunas botellas de jugos y salsa de tomate (Ochoa, 2017).

La identificación y la clasificación de los objetos de plástico es fundamental para su posterior reciclaje, pero no siempre es sencillo identificar los distintos tipos de resinas plásticas si no están correctamente señaladas con su simbología y si además contienen componentes como barreras, aditivos, etiquetas de cuerpo completo o están mezclados con papeles, restos orgánicos y metales, entre otros (Observatorio Educación y Trabajo, 2015).

ESTRATEGIAS CONVENCIONALES PARA LA REMOCIÓN DE PLÁSTICOS

A. REDUCCIÓN DE LOS PLÁSTICOS

La reducción en origen es el primer paso hacia una gestión sostenible de los residuos y ello supone la disminución de la cantidad de plásticos que se utilizan, así como el diseño de productos que reduzcan

la utilización de estos materiales. En los últimos años se ha reducido el peso de algunos envases, pero es necesario tomar más medidas como la estandarización de envases y la simplificación de los polímeros que los componen.

B. REUTILIZACIÓN DE LOS PLÁSTICOS

La reutilización directa de los materiales plásticos está limitada actualmente al 1-2 %, debido a los cada vez más elevados requerimientos de calidad de los productos. Además, gran parte del plástico presente en la basura doméstica es del tipo filme, muy difícil de recuperar. El deterioro de la calidad y también del aspecto físico del producto ha ido acompañado en las dos últimas décadas de una reducción del coste de las materias primas, siempre derivadas del petróleo (Arandes et al., 2004). Cuando la reutilización no sea el modo ambientalmente más racional de extraer valor de los residuos, una opción es reciclarlos como materia prima o utilizarlos para recuperar energía de forma que no se pierda su valor exclusivo (MAVDT, 2004).

C. RECICLAJE DE LOS PLÁSTICOS

El reciclaje de plásticos goza de gran popularidad en el mundo entero. Su impacto positivo a escala social, ambiental y económica, lo convierten en la industria del momento, puesto que el aumento de la demanda de plásticos reciclados está motivado por diversos factores, entre los que se incluyen un creciente énfasis en sostenibilidad entre fabricantes de empaques y bienes de consumo, notables adelantos en tecnologías de reciclaje y mejoras en la infraestructura de acopio de los materiales para reciclar (Castro, 2013).

La reducción en la fuente es la principal estrategia que se usa para disminuir las cantidades de plásticos que son llevados a los rellenos sanitarios, pues es una manera de concebir los productos con un nuevo criterio ambiental. Esta estrategia de remoción consiste en la recolección, acopio, reprocesamiento y remercadeo de productos plásticos que podrían ser considerados desechos (Frers, 2009). Pero algunos de los inconvenientes de esta alternativa son que para su reciclamiento los plásticos deben ser manejados adecuadamente, no solo en su recolección y procesamiento, sino en la limpieza, selección y separación adecuada de los materiales a reciclar, y esto no se da en muchos casos.

Adicionalmente, no todos los plásticos son reciclables. Los termoplásticos en general sí lo son, mientras que los plásticos termoestables (aquellos que al ser moldeados sufren modificaciones irreversibles) no. Otra parte de la problemática consiste en que una gran cantidad de basura, incluyendo los plásticos, es desechada en barrancas, ríos, calles, etc. Algunas estimaciones hablan hasta de un 30 %. En México se estima que, de los plásticos que son desechados, se colecta únicamente el 12 %. (Segura et al., 2007).

En cuanto al proceso de reciclaje de los plásticos, hay tres técnicas: mecánica, química y la reutilización por medio de la combustión. Estas se muestran más detalladamente en la figura 2.

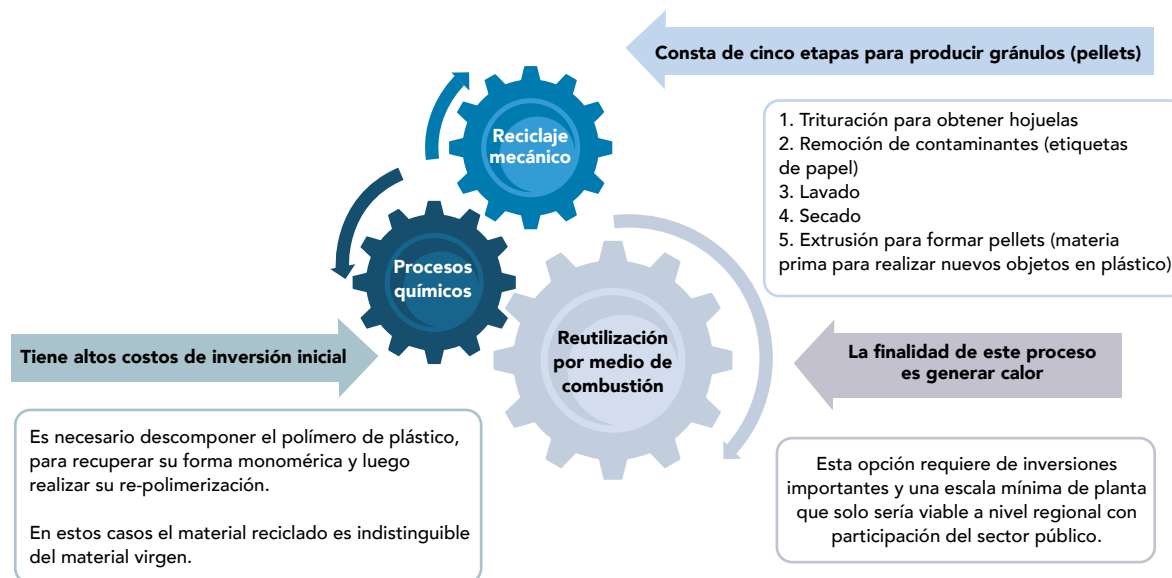


Figura 2. Técnicas del proceso de reciclaje de los plásticos.

Fuente: Observatorio Educación y Trabajo, 2015.

El proceso de reciclado y el producto final dependerá del tipo de plástico que se recicle. Además, el reciclado se facilita con el empleo de envases PET transparente, ya que sin pigmentos tiene mayor valor y mayor variedad de usos como la fabricación de textiles para la confección de alfombras, cuerdas, cepillos y escobas, telas, calzados y láminas extruidas (Observatorio Educación y Trabajo, 2015).

ESTRATEGIAS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE PLÁSTICOS

La biodegradación o biorremediación es un proceso metabólico y enzimático realizado por microorganismos como bacterias y algunos hongos, los cuales secretan enzimas que se encargan de romper la estructura molecular del plástico y lo reducen en su peso a través del tiempo. Por su eficiencia, la biodegradación es un proceso aceptado por la comunidad científica, ya que los microorganismos atacan la superficie del plástico y lo utilizan como fuente de carbono para su crecimiento: lo comen y a su vez lo degradan, tanto de forma aeróbica como anaeróbica (Arutchevi et al., 2000).

En los últimos años, los avances en ingeniería genética han permitido el desarrollo de organismos transgénicos. La biorremediación hace uso de esta nueva tecnología para resolver varios problemas de contaminación. Gracias a esto, el futuro promete aún más, pues muchos grupos de investigación están desarrollando plantas y microorganismos genéticamente modificados para ser mejores agentes de biorremediación, es decir, para que degraden mejor o más eficientemente a los agentes contaminantes (Por Qué Biotecnología, 2006).

El uso de las tecnologías de biorremediación para el tratamiento de sitios contaminados es relativamente reciente y presenta varias ventajas respecto de los métodos fisicoquímicos tradicionales. Algunas de estas ventajas son bajos costos de instalación y operación, una tecnología simple y de fácil aplicación, un tratamiento seguro que no presenta riesgos para la salud y además un tratamiento tecnológicamente efectivo (Eweis, Ergas, Chang & Schroeder, 1998).

Para realizar el proceso de biorremediación hay tres tipos de procedimientos: remediación microbiana, degradación enzimática y fitorremediación.

Remediación microbiana: Implica la adición de microorganismos directamente en el lugar de la contaminación. Estos pueden pertenecer o no al entorno contaminado, en cuyo caso deben ser inoculados. La descontaminación se produce debido a la capacidad natural que tienen ciertos organismos de transformar moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas, que resultan menos tóxicas (Porque biotecnología, 2006). Otra de las ventajas es que muchos contaminantes tienen estructuras similares a las presentes en compuestos naturales y es por ello por lo que son fácilmente degradados por los microorganismos del suelo y del agua. Sin embargo, existen otros compuestos con estructuras o sustituyentes más complejos de origen xenobiótico, que son difícilmente catabolizados (Manacorda y Cuadros, 2005).

Degradación enzimática: Este mecanismo consta del uso de enzimas en el sitio que ha sido contaminado, para degradar los elementos nocivos. Dichas enzimas provienen de bacterias sometidas a alteraciones genéticas, a través de compañías de biotecnología dedicadas a ello. Consiste en utilizar enzimas que debilitan la membrana celular que puede ser destruida para liberar los gránulos y ser purificados por extracción con disolventes (Elías y Jurado, 2012).

Fitorremediación: Surgió como una alternativa económica y amigable con el ambiente que se puede aplicar in situ. Además, la participación de los microorganismos también puede mejorar la eficiencia de la fitorremediación, debido a que estos son capaces de alterar la biodisponibilidad de los elementos potencialmente tóxicos. El éxito de este proceso depende del empleo de plantas adecuadas para limpiar ambientes que han sido contaminados (Perea et al., 2015).

REMOCIÓN DE PLÁSTICOS CON ORGANISMOS VIVOS

Según investigaciones realizadas, la remoción del plástico se hace usando la remediación microbiana y la degradación enzimática, como se muestra en la tabla 9. Allí se evidencia que todos los procesos se realizaron con microorganismos, puesto que hasta ahora se ha encontrado que muchos de ellos degradan el plástico por sí mismos o a través de sus enzimas.

Tabla 13. Algunas investigaciones realizadas sobre remoción de plásticos.

Nombre del organismo utilizado	Tipo de plástico que se degrada	Resultados
<i>Ideonella sakaiensis</i> 201-F6	PET	Investigadores de la Universidad de Kioto identificaron que, al examinar las comunidades microbianas naturales expuestas al PET en el ambiente, aislaron esta nueva bacteria que puede utilizar PET como su principal fuente de energía y carbono. Cuando se cultiva en PET, esta cepa produce dos enzimas capaces de hidrolizar el PET y la reacción intermedia: el ácido mono (2-hidroxietil) y el tereftálico (MHET). Se requieren ambas enzimas para convertir enzimáticamente el PET de manera eficiente en sus dos monómeros benignos para el medio ambiente: ácido tereftálico y etilenglicol. Esta bacteria puede degradar casi en su totalidad una lámina delgada de PET tras seis semanas a una temperatura de 30 °C (Yoshida et al., 2016).
<i>Pestalotiopsis microspora</i>	Poliuretano en suspensiones sólidas y líquidas	<p>Los autores analizaron este hongo descubierto en 2008 en el Parque Nacional Yasuní (Ecuador) e identificaron una enzima de la familia de la hidrolasa serina como responsable de la degradación del poliuretano en suspensiones sólidas y líquidas.</p> <p>Los endófitos aislados de muestras de plantas de la Amazonía ecuatoriana se cribaron por su capacidad para degradar poliuretano poliéster (PUR). Casi la mitad de los organismos mostraron alguna actividad en el ensayo inicial de eliminación de placas. Dieciocho endófitos activos y dos inactivos se caracterizaron adicionalmente. Ocho de los organismos más activos pertenecían al género <i>Pestalotiopsis</i>.</p> <p>La enzima producida por <i>Pestalotiopsis microspora</i>, que es responsable de la degradación de PUR, parece ser un miembro de la familia de la serina hidrolasa. Además, la actividad se extendió a lo largo del medio a una distancia bien separada de las áreas de crecimiento fúngico. Esto sugiere que la enzima responsable de la degradación es extracelular, secretada y difusible (Russell et al., 2011).</p>
La larva del coleóptero <i>Tenebrio molitor</i>	Poliestireno	<p>Conocido como el gusano de la harina, se experimentó alimentar larvas de este escarabajo con una dieta de poliestireno extruido (XPS o styrofoam, un tipo de plástico muy común como aislante en edificios y protector en embalajes).</p> <p>En los resultados del experimento se obtuvo que los gusanos puestos en la caja con espuma de poliestireno comieron entre 34 y 39 miligramos de plástico al día, convirtiendo la mitad del poliestireno en dióxido de carbono. Una parte del plástico ingerido fue</p>

Nombre del organismo utilizado	Tipo de plástico que se degrada	Resultados
		excretado por los gusanos como fragmentos biodegradados. Los científicos comprobaron que el estómago de estas larvas contiene unas enzimas capaces de degradar el poliestireno sin que este producto sintético produzca problemas de salud (Yang et al., 2015).
<i>Alicyclophilus sp</i>	Poliuretano	<p>Colocaron muestras de este hule en matraces con un medio de cultivo con algunas sales minerales y poliuretano como fuente de carbono (como su alimento principal). Aislaron las bacterias que crecieron y las identificaron como del género <i>Alicyclophilus sp</i>. Ya que las bacterias no tienen boca para alimentarse, liberan al medio que las rodea enzimas que les permiten degradar el poliuretano en moléculas más pequeñas para absorberlas por su pared celular.</p> <p>La enzima que puede hacer esto es una enzima denominada esterasa que rompe los fuertes enlaces del poliuretano. Después de este hallazgo, lo que ha proseguido es identificar los genes que están involucrados en esta actividad de degradación y crear bacterias transgénicas más eficaces que expresen estas enzimas (Ceguera et al., 2007).</p>
<i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Acinetobacter ursingii</i>	PEBD	<p>Esta degradaría eficientemente PEBD y podría utilizarlo como una única fuente de carbono para su supervivencia. Se encontró que <i>Pseudomonas</i>, aislada del vertedero de lodos cloacales, puede degradar polietileno natural y sintético de manera muy eficiente.</p> <p>Los resultados del presente estudio arrojaron que los tres aislamientos (SHw43, Tw53 y Mw51) son los que degradan en mayor cantidad el PEBD. Estos se identificaron como <i>Pseudomonas fluorescens</i> (93 % de probabilidad), <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (99 %) y <i>Acinetobacter ursingii</i> (99 %), respectivamente (Hussein et al., 2015).</p>
<i>Cepa S1 de Achromobacter denitrificans</i>	PEBD	El artículo revela la biodegradación del polietileno de baja densidad por la cepa bacteriana aislada del agua marina cerca de Visakhapatnam. La capacidad de degradación de la cepa bacteriana se evaluó mediante la realización del método de eliminación en la zona del polietileno. La cepa bacteriana se identificó y se confirmó como cepa S1 de <i>Achromobacter denitrificans</i> , mediante secuenciación del gen 16S rRNA y análisis filogenético. El perfil de lípidos se realizó por análisis FAME usando GCMS y ESI-MS. Luego se evaluó la capacidad de degradación del polietileno de la cepa midiendo la pérdida de peso seco en películas de polietileno de baja densidad (LDPE) (grosor de 20 y 40 micras). La degradación de PEBD se confirmó adicionalmente mediante ensayos de tracción, RMN, DRX, termogravimétrico, análisis de carbono y análisis GCMS (Ambika et al., 2015).
<i>Consortio de Curvularia lunata</i> , <i>Alternaria alternata</i> , <i>Penicillium simplicissimum</i> y <i>Fusarium sp.</i>	Polietileno	El trabajo se basó en el aislamiento de hongos como, <i>Curvularia lunata</i> , <i>alternaria alternata</i> , <i>Penicillium simplicissimum</i> y <i>Fusarium sp.</i> de tiraderos locales de Shivamogga. El experimento de degradación se llevó a cabo usando polietileno de superficie esterilizado para un período de 3 meses y la degradación fue confirmada por la pérdida de peso, a través de procedimientos de espectroscopía infrarroja de Fourier Transform y microscopía electrónica de barrido. La pérdida de peso individual mostrada por <i>Curvularia lunata</i> (1,2 %), <i>Alternaria</i> (0,8 %), <i>Penicillium simplicissimum</i> (7,7 %) y <i>Fusarium sp.</i> (0,7 %) fue menor en comparación con su combinación (27 %). Las enzimas responsables de la degradación del polietileno también se cribaron y se identificaron como lacasa y manganeso peroxidasa. Por lo tanto, los resultados confirman el importante papel del consorcio en la degradación del polietileno en comparación con microorganismos individuales (Sowmya et al., 2015).

ORGANISMOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE DEGRADACIÓN DE LOS PLÁSTICOS

Bacillus subtilis: Es una bacteria grampositiva, Catalasa-positiva, aeróbica, comúnmente encontrada en el suelo. Miembro del género *Bacillus*, *B. subtilis*, tiene la habilidad para formar una resistente endospora protectora que le permite tolerar condiciones ambientalmente extremas. Sus esporas son resistentes a factores ambientales como el calor, el ácido y la sal, y pueden persistir en el ambiente por largos períodos de tiempo. Antes de la decisión de producir la espora de la bacteria podría llegar a ser móvil, a través de la producción de flagelos, y también tener el ADN del medioambiente mediante el sistema de competencia (Sánchez et al., 2016).

Las bacterias del género *Bacillus* son universales. Debido a su capacidad para formar esporas, pueden vivir en el ambiente por varios años y tienen la capacidad de degradar el plástico a un ritmo lento: su biodegradación puede demorar meses. Este es un proceso en el que se altera la estructura del plástico para hacerlo vulnerable y que desaparezca como residuo. En el proceso de degradación de un plástico se observan variaciones tanto físicas como químicas. Las modificaciones más palpables se encuentran en la pérdida del brillo, el color y la formación de grietas (Carroll et al., 2010).

Brevibacillus borstelensis: Es una bacteria grampositiva, aeróbica, formadora de endosporas del género *Brevibacillus*. El genoma de varias cepas de *Brevibacillus borstelensis* se ha secuenciado. Este microorganismo puede degradar el polietileno de baja densidad (considerado como inerte), como fuente de carbono, a las temperaturas de 37 °C, 46 °C y 55 °C durante un mes de incubación. También es capaz de utilizar PS como fuente de carbono a las temperaturas de 46 y 55°C, en el mismo tiempo de incubación (Villa et al., 2008).

La cepa 707 de esta bacteria es una cepa termofílica capaz de degradar y utilizar el polietileno como su única fuente de carbono. Se demostró que esta cepa reduce la cantidad de polietileno en un 30 % (30 días a 50 °C) y demuestra que los plásticos no degradables como el polietileno pueden degradarse en condiciones apropiadas (Jenkins et al., 1996).

Ideonella sakaiensis: Es un microorganismo capaz de utilizar el PET como fuente de carbono. Es capaz de desintegrar el polietileno de tereftalato hasta sus componentes originales, es decir, ácido tereftálico y etilenglicol. Para ello cuenta con un juego de enzimas que son proteínas encargadas de degradar un producto. La primera de ellas se encarga de convertir el plástico en un producto llamado monotereftalato. Una vez que se ha digerido, es capturado y vuelto a “digerir” mediante otra enzima, pero esta vez dentro de la bacteria. Así, este organismo convierte el PET en su fuente principal de carbono (Yoshida et al, 2016).

Es una bacteria del género *Ideonella* y de la familia de comamonadaceae, el cual fue hallado en el interior de una planta de reciclaje de botellas de plástico. Debido a que el PET solo hace 70 años que existe, significa que la bacteria ha evolucionado en este sentido en ese tiempo. Este hallazgo supone un enorme avance para el mundo del reciclaje y la reutilización (Reiter et al., 2003).

***Pestalotiopsis microspora*:** Es un hongo endófito capaz de digerir poliuretano en condiciones aeróbicas y anaeróbicas. Este hongo fue encontrado en la selva de Ecuador por un grupo de investigadores dirigidos por Scott Strobel, en una expedición al Parque nacional Yasuní (PNY). Su capacidad para degradar el poliuretano lo convierte en un organismo de interés en biorremediación, al poseer enzimas que permiten digerir este tipo de compuestos y convertirlos en su única fuente de carbono (Santamaría, 2016).

***Pseudomonas aeruginosa*:** Es un bacilo gramnegativo aeróbico, considerado un patógeno oportunista. Es un microorganismo altamente versátil, capaz de tolerar condiciones bajas de oxígeno. Puede sobrevivir con bajos niveles de nutrientes y crecer en rangos de temperatura de 4 a 42 °C. Estas características le permiten adherirse, sobrevivir en equipos médicos y en otras superficies; además, es un habitante común de agua, suelos y plantas (Ochoa et al., 2013). Según la investigación realizada por Gutiérrez (2018), esta bacteria se incubó en un medio de cultivo enriquecido con polietileno de baja densidad. “Las colonias que se acondicionaron a un agar al 100 % de contenido de polietileno fueron sometidas a un segundo acondicionamiento en agar hecho a base de cetrimide y polietileno para lograr las condiciones de aislamiento diferencial” (p. 111). Se registró crecimiento de colonias a las 72 horas de monitoreo y al 100 % de contenido de polietileno, en cepa pura de 0,5 x10⁶ UFC, indicando que las bacterias *Pseudomonas aeruginosa* son capaces de degradar polietileno de baja densidad.

***Pseudomonas putida*:** Es una de las especies de mayor interés industrial entre las bacterias del género *Pseudomonas*, porque además de su potencial de degradación de compuestos aromáticos y xenobióticos puede colonizar el sistema radicular de las plantas, formar biopelículas y ser manejable desde el punto de vista genético. La cepa *Pseudomonas putida* KT2440 es una mutante deficiente del sistema de restricción de ADN de la cepa *Pseudomonas putida* mt-2 aislada originalmente en Japón. Esta última cepa es portadora del plásmido TOL: pWW0,1 que codifica una ruta de degradación de tolueno y xilenos que es una de las mejores caracterizadas en el ámbito de la biodegradación en cuanto a los aspectos bioquímico y genético (Luján, 2014).

***Pseudomonas spp*:** Son especies de bacterias como *Pseudomonas fluorescens* y *P. aeruginosa* que evidencian una gran capacidad para degradar el polietileno en ambientes acuáticos con un pH de 7 y a 30–37 °C. El pH ácido impacta seriamente negativamente en sus actividades en comparación con la condición alcalina (Hussein et al., 2015). Adicionalmente, se conoce que un consorcio de bacterias (*Pseudomonas putida*, *Pseudomonas fluorescens*, *Vibrio alginolyticus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas stutzeri*, especies de *Flavobacterium* y especies de *Anabena*) también degradan este plástico en condiciones ligeramente alcalinas (pH 7,5) a 26 °C (Veethahavya et al., 2016).

Se ha descrito que la mayoría de las especies de *Pseudomonas* puede procesar diferentes polímeros plásticos y sus subproductos mediante la unión a la superficie celular dentro de biopelículas, la liberación de enzimas catalíticas involucradas en la oxidación o hidrólisis del polímero plástico, la activación de las vías metabólicas responsables de la absorción y asimilación de fragmentos de plástico, entre otros (Wilkes y Aristilde, 2017). Por otra parte, el género *Penicillium* spp muestra su actividad degradativa sobre polietileno en asociación con *Bacillus* spp, lo que evidencia la efectividad de la asociación en consorcios microbianos. También ha sido reportado el biodeterioro ejercido por algas y otras especies de microorganismos (Gutiérrez, 2013).

Tenebrio molitor: Es un insecto comestible perteneciente a la familia Tenebrionidae y al orden coleóptero, que está ganando cada vez más atención en el sector científico como una solución valiosa para la bioconversión de residuos orgánicos y plásticos, y la recuperación biológica de PHA (Sangiorgio et al. 2022). Gracias a su microbiota intestinal altamente diversificada, *T. molitor* es una de las pocas especies de insectos capaces de descomponer la matriz lignocelulósica de los residuos de celulosa resistentes como el cartón y los residuos plásticos, como el poliestireno (PS), el polietileno (PE), el polipropileno (PP) y el cloruro de polivinilo (PVC) (Wu y Criddle 2021).

Según Carroll et al. (2016), *T. molitor* y su microbiota intestinal son capaces de liberar polihidroxialcanoatos (PHA) de los microorganismos productores de plástico. Los PHA son un grupo de poliésteres biodegradables naturales que pueden dar lugar a plásticos biodegradables de base biológica, reemplazando potencialmente a algunos plásticos de base petroquímica (Sangiorgio et al. 2022).

PLÁSTICOS BIODEGRADABLES

Un material es biodegradable si la degradación ocurre como resultado de la acción de microorganismos y el material sufre descomposición en materia orgánica y minerales. Sin embargo, los plásticos compostables son degradables por los procesos biológicos en condiciones específicas (humedad, temperatura y tiempo) que ocurren durante el compostado y se convierten en dióxido de carbono, agua y biomasa, que no dejan residuos tóxicos visibles (Rodríguez, 2012).

Se han desarrollado cuatro tipos de plásticos degradables: los fotodegradables, los semibiodegradables, los biodegradables sintéticos y los completamente biodegradables naturales (Segura et al., 2007).

Los plásticos fotodegradables tienen grupos sensibles a la luz incorporados directamente al esqueleto del polímero. Con la luz ultravioleta, (en varias semanas o meses) la estructura polimérica puede desintegrarse en una estructura abierta que le permite ser descompuesta a partículas de plástico más pequeñas, que en algunos casos son susceptibles de degradación por bacterias (Rodríguez, 2012). No obstante, en los rellenos sanitarios, la ausencia de luz hace que permanezcan como material no degradable (Segura et al., 2007).

Los plásticos semibiodegradables tienen azúcares unidos a fragmentos cortos de polietileno. Una vez en los rellenos sanitarios, las bacterias degradan los azúcares y liberan el polietileno. Sin embargo, este permanece como material no degradable. En la actualidad se ha desarrollado otro tipo de plástico sintético degradable: es un plástico basado en alcohol polivinílico con estructura parecida al polietileno (Rodríguez, 2012).

Plástico sintético. Recientemente se ha desarrollado otro tipo de plástico sintético que es degradable. Este es un plástico basado en polietenol o alcohol polivinílico con estructura parecida al polietileno. La presencia de grupos hidroxilo (-OH) en este polímero lo hacen hidrofílico y, por lo tanto, soluble en agua.

Los completamente degradables naturales son los ácidos poliláctidos, los poliésteres alifáticos, los polisacáridos y copolímeros derivados de ellos, y los polihidroxialcanoatos (PHA) (Segura et al., 2007).

Plásticos degradables naturales son materiales plásticos completamente asimilables por los microorganismos presentes en un medio biológico activo, quienes lo utilizan como alimento y fuente de energía. El carbono de la estructura de los plásticos debe convertirse completamente en CO₂ durante la actividad microbiana (Castellón, 2010). Su producción es sostenible a partir de residuos de la agroindustria y la biodegradación de estos materiales produce O₂ y H₂O, lo que contribuye con el cuidado del medio ambiente (Aradilla et al, 2012).

Polihidroxialcanoatos (PHA) son plásticos biocompatibles y biodegradables, sintetizados por una amplia variedad de microorganismos. Comparten características muy similares con los plásticos de origen petroquímico.

Estudios recientes se centran en la búsqueda de sustratos económicos y en estrategias de extracción que permitan la reducción de los costos del producto y de esta forma puedan incursionar en un mercado ampliamente difundido en el que dominan los plásticos derivados del petróleo (Lemos y Mina, 2015). Los polihidroxialcanoatos son polímeros de ácidos hidroxialcanoicos que algunos microorganismos acumulan intracelularmente como material de reserva, para usarlos posteriormente como fuente de carbono y energía. El polímero es degradado primero por una enzima llamada depolimerasa, que lo rompe liberando los monómeros (hidroxialcanoatos), que son moléculas que las bacterias pueden asimilar en su metabolismo (Khanna & Srivastava, 2005).

Por ejemplo, la *Azotobacter vinelandii*. La familia Azotobacteriaceae comprende a las bacterias del género *Azotobacter*, las cuales son eubacterias gramnegativas que tienen una pared celular compleja que consiste en una membrana externa y una capa interna de peptidoglicano que contiene ácido murámico y mureína. Se reproducen por fisión binaria, viven en suelos y en aguas frescas, son células ovoides y grandes de 1,5 a 2,0 μm de diámetro. Son pleomórficas y varían su morfología desde bacilos

hasta células en forma de cocos. Se les observa como células individuales, como pares o formando agregados irregulares, y algunas veces formando cadenas de tamaño variable (Espín, 2002). Esta es una bacteria productora de PHA; puede acumular PHB (polihidroxibutirato) hasta un 90 % de su peso seco. Además de producir PHB, es capaz de sintetizar otros PHA más interesantes, como el copolímero de hidroxibutirato e hidroxivalerato. Otra característica interesante es su capacidad para producir PHA utilizando sustratos de bajo costo, como algunos desechos agroindustriales: melazas de caña, de remolacha, peptona de pescado y desechos de la crianza de cerdos (Segura et al., 2007).

Así como los organismos capaces de producir PHA son abundantes en la naturaleza, también lo son aquellos capaces de degradarlos. Los grupos de organismos con representantes capaces de “comer” PHA son las bacterias (grampositivas, gramnegativas, actinobacterias) y los hongos. Estos comedores de PHA pueden obtener energía y nutrientes al degradarlos (Segura et al., 2007).

EL POLIÁCIDO LÁCTICO O ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

Es un polímero natural, un almidón, un gran hidrato de carbono que las plantas sintetizan durante la fotosíntesis. Los cereales como el maíz y el trigo contienen gran cantidad de almidón y son la fuente principal para la producción de PLA. Los bioplásticos producidos a partir de este polímero tienen la característica de una resina que puede inyectarse, extruirse y termoformarse (Castellón, 2010).

Las moléculas de PLA pueden ser sintetizadas mediante un proceso de polimerización por condensación de ácido láctico a temperatura no inferior a 120 °C, o por debajo de esta temperatura en presencia de catalizadores. Mediante este método, solamente es posible obtener polímeros de bajo peso molecular ($PM < 10.000$). Para la obtención de copolímeros de elevado peso molecular, es necesario tener como materiales de partida los dímeros cíclicos del ácido, en presencia de catalizadores y condiciones controladas de temperatura y presión (Weng et al., 2013).

Entre las ventajas que presenta el PLA, se tiene que es biodegradable, reciclable y compostable. Es así como se puede degradar en dióxido de carbono, agua y otras moléculas pequeñas en condiciones de compostaje, lo que contribuye a la simplificación de dicho proceso (Rasal et al., 2010).

Las propiedades mecánicas del PLA junto a su carácter biodegradable lo convierten en un buen candidato para aplicaciones en sectores de gran consumo como el mercado del envase y el embalaje. Para poder utilizar el PLA en este mercado, es necesario optimizar algunas de sus propiedades, tales como la resistencia al impacto, la temperatura de distorsión bajo carga (HDT) y el efecto barrera a los gases (Velázquez et al., 2014).

Copolímeros

Es una macromolécula compuesta por dos o más monómeros o unidades repetitivas distintas, que se pueden unir de diferentes formas por medio de enlaces químicos. Los monómeros pueden distribuirse de forma aleatoria o periódica. Si se alternan largas secuencias de uno y otro monómero, se denomina copolímero en bloque. Si el cambio de composición se produce en las ramificaciones, se trata de un copolímero ramificado (Jenkins et al., 1996).

Estos materiales contienen varias unidades estructurales, como es el caso del estireno. Estas combinaciones de monómeros se realizan para modificar las propiedades de los polímeros y lograr nuevas aplicaciones, con lo cual se busca que cada monómero imparta una de sus propiedades al material final. Evidentemente, al variar las proporciones de los monómeros las propiedades de los copolímeros van variando también, de manera que el proceso de copolimerización permite hasta cierto punto fabricar polímeros a la medida (Vigilante, 2009).

CONCLUSIONES

La biorremediación suele ser un medio rentable para restaurar la calidad del medio ambiente y más si se realiza con bacterias, las cuales ayudan a la disminución del impacto ambiental que generan contaminantes como los plásticos.

El plástico biodegradable es fabricado con materias primas orgánicas que provienen de fuentes renovables. Por ende, la creación de plásticos biodegradables está en auge ya que es la alternativa para no acabar con la industria productora. Por eso, la tendencia se dirige hacia el almidón para bolsas y el PLA para envases rígidos.

Una de las ventajas de que haya muchas bacterias que degraden los diferentes tipos de plástico es que, fomentando estrategias para usarlas, ayudarían a mejorar la salud del planeta, ya que se disminuiría el nivel de contaminación del mundo y mejoraría la calidad de vida de las personas.

Los productos fabricados con bioplásticos son flexibles y se pueden trabajar utilizando los procesos tradicionales de los plásticos. Además, una de sus grandes ventajas es que, al ser fabricados con bacterias, también habrá bacterias y procesos ambientales que ayuden a que la degradación de estos sea mucho más rápida y se logre que esto sea un ciclo cerrado y se disminuya la contaminación que se presenta en el mundo.

El uso de plásticos biodegradables reduce la contaminación y la producción de los plásticos derivados del petróleo. Pero una de sus principales barreras es que la reutilización de los plásticos es complicada, ya que la población no cuenta con la capacidad de diferenciarlos y separarlos adecuadamente en la

fuentes, lo que dificulta que se pueda llevar a cabo una notable disminución de este residuo en el medio ambiente y se sigan contaminando muchos lugares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambika, K.; Lakshmi, B.; & Hemalatha, K. (2015). Degradation of low-density polythene by achromobacter denitrificans strain s1, a novel marine isolate. Department of Microbiology, Andhra University, Visakhapatnam 530 003, Andhra Pradesh, India. *International Journal of Recent Scientific Research*. 6(7), 5454-5464. <https://goo.gl/YUircA>.
- Aradilla, D., Oliver, R. & Estrany, F. (2012). Polímeros biodegradables: una alternativa de futuro a la sostenibilidad del medio ambiente. *Técnica Industrial*. 297: 76-80. <http://www.tecnica-industrial.es/tiadmin/numeros/82/889/a889.pdf>.
- Arandes, J., Bilbao, J. & López, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5. <http://www.arpet.org/docs/Reciclado-de-residuos-plasticos-Revista-Iberoamericana-de-Polimeros.pdf>
- Aristegui Maquinaria. (6 de agosto de 2015). Usos y ventajas del HDPE. <https://goo.gl/E1DWZc>.
- Arutchelvi, J., Sudhakar M., Arkakar A., & Doble, M. (2000). Biodegradation of polyethylene and polypropylene. *Indian Journal of biotechnology*. 7, 9-22.
- Carroll, K.; Hobden, J.; Miller, S.; Morse, S.; Mietzner, T.; Detrick, B.; Mitchell, T.; McKerrow, J. y Sakanari, J. (2016). *Microbiología Médica*. Editorial McGraw-Hill Global Education Holdings.
- Castellón, H. (2010). Plásticos oxo-biodegradables vs. Plásticos biodegradables: ¿cuál es el camino? *Corporación Americana de Resinas, Coramer, C. A.* <https://goo.gl/jmaqCv>.
- Castells, X y Jurado, L. (2009). Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración. Ediciones Díaz de Santos. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecauniboyacasp/detail.action?docID=3228526>.
- Castro, S. (2013). América Latina muestra avances en reciclaje de plásticos recuperados. <http://www.plastico.com/temas/America-Latina-muestra-avances-en-reciclaje-de-plasticos-recuperados+3091892>.
- Ceguera, A.; Carrillo A., López N.; Bolaños, S.; Cruz M.; Wachter, C. & Loza, H. (2007). Characterization of the Polyurethanalytic Activity of Two Alicyclophilus sp. Strains Able To Degrade Polyurethane and N-Methylpyrrolidone. *Applied and Environmental Microbiology* 73(19): 6214–6223.

- Chunga, L. y Cieza, C. (2017). Biodegradación de poliestireno utilizando microorganismos presentes en el humus de lombriz durante los meses, octubre – diciembre 2016. Universidad de Lambayeque [Tesis de pregrado]. Escuela profesional de ingeniería ambiental. Chiclayo.
- Cristán, A., Ize, I. & Gavilán, A. (2003). La situación de los envases de plástico en México. *Gaceta ecológica* (69). <https://www.redalyc.org/html/539/53906905/>.
- Elias, X. y Jurado, L. (2012). Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración. En Elias, X. (Ed.). *Reciclaje de Residuos industriales*. Ediciones Diaz de Santos.
- Espín, G. (2002). *Biología de Azotobacter vinelandii*. <https://goo.gl/DxTBho>.
- Frers, C. (2009). *El reciclado de plásticos*. El Cid Editor. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecauniboyacasp/detail.action?docID=3182173>.
- Garzón, J., Rodríguez, J. y Hernández, C. (11 de agosto de 2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. Universidad y Salud, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Gil, A. (2012). *Resinas de Poliéster. Guía de manejo*. EAFIT. <http://www.eafit.edu.co/servicios/centrodelaboratorios/infraestructura/laboratorios/Documents/Guia%20de%20manejo%20de%20resinas.pdf>.
- Guerrero, C., Lozano, T., González, V. & Arroyo, E. (2003). Morfología y propiedades de politereftalato de etilen-glicol y polietileno de alta densidad. *Ciencia UANL*, VI(2). http://eprints.uanl.mx/1297/1/morfologia_politereftalato.pdf.
- Gutiérrez, S. (2013). Biodegradación de polietileno de baja densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario, Lima, Perú. *Revista Peruana De Biología*, 17(1). <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v17i1.62>.
- Gutiérrez, K. (2018). Influencia de factores ambientales de crecimiento microbiano en la degradación de Polietileno de Baja Densidad por la bacteria pseudomona aeruginos en Huancayo. [Tesis de Pregrado]. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental. Huancayo.
- Hussein, A.; Mayaly, I. & Khudeir, S. (2015). Isolation, Screening and Identification of Low-Density Polyethylene (LDPE) degrading bacteria from contaminated soil with plastic wastes. *Mesopotamia Environmental Journal*, 1(4): 1- 14. https://bumej.com/papers/mej_pub2015_81756339.pdf

- Hussein, A.; Khudhair, S.; Al-Mayaly. (2015). Optimum conditions for LDPE strips biodegradation by local bacterial isolates J. Int. Environ. Appl. Sci., 10 (4): 399-407.
- Jenkins, A.; Kratochvíl, P.; Stepto, R.; Suter, U. (1996). «Glossary of Basic Terms in Polymer Science». Pure Appl. Chem, 68.
- Kalpakjian, S. y Schmid, S. (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Pearson Educación. https://books.google.com.co/books?id=gilYI9_KKAoC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false.
- Khanna, S. & Srivastava A. (2005). Statistical media optimization studies for growth and PHB production by *Ralstonia eutropha*. Process Biochemistry 40, 2173-2182.
- Lemos, A. y Mina, A. (2015). Polihidroxialcanoatos (PHA) producidos por bacterias y su posible aplicación a nivel industrial. Informador Técnico. 79(1): 93-101.
- López, R. (2008). Aislamiento de microorganismos degradadores de Tereftalato de Polietileno (PET) en condiciones aerobias. Instituto politécnico nacional. Unidad profesional interdisciplinaria de tecnología.
- Luis, A., Rendon, N. y Korody, M. (2008). Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (pet) – cemento. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. 23(1).
- Luján, D. (diciembre de 2014). *Pseudomonas aeruginosa*: un adversario peligroso. Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana, 465-474.
- Manacorda, A. y Cuadros, D. (2005). Técnicas de remediación biológicas. Microbiología ambiental. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-abierta-y-a-distancia-de-mexico/ingenieria-ambiental/54218414-tecnicas-de-remediacion-biologic-en-el-uso-de-los-suelos/23735268>
- MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). (2004). Sector Plásticos. Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos posconsumo. Guías ambientales.
- Observatorio Educación y Trabajo. (2015). Sector Plásticos. <https://planeamientoeducativo.utu.edu.uy/sites/planeamientoeducativo.utu.edu.uy/files/2018-06/informe-Plastico-23-6.pdf>.

- Ochoa, N. (2017). Propuesta integral para el aprovechamiento del plástico a partir de los residuos sólidos resultantes del embalaje de plaguicidas (residuos respel) [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Ochoa, S., López, F., Escalona, G., Cruz, A., Dávila, L., López, B., Jiménez, Y., Giono, S., Eslava, C., Hernández, R. y Xicohtencatl, J. (2013). Características patogénicas de cepas de *Pseudomonas aeruginosa* resistentes a carbapenémicos, asociadas con la formación de biopelículas. *Bol Med Hosp Infant.* 70(2): 138-150.
- Perea, Y., Carrillo, R., Solís, F. y González, M. (2015). Fitorremediación de un residuo de mina asistida con enmiendas y bacterias promotoras de crecimiento. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal.* 6(1), 31-49. DOI 10.7603/s40682-015-0003-4.
- Plastivida (2007). Degradación de los materiales plásticos. *Boletín Técnico Informativo*, (21). Centro de Información Técnica. <http://ecoplas.org.ar/pdf/21.pdf>.
- Por Qué Biotecnología (2006). Biorremediación: organismos que limpian el ambiente. *El cuaderno de porque biotecnología* (36).
- QuimiNet (2010). Características del policloruro de vinilo (PVC). <https://www.quiminet.com/articulos/caracteristicas-del-policloruro-de-vinilo-pvc-42725.htm>.
- Quiminet (2012). Características y aplicaciones del polietileno de baja densidad (LDPE). <https://goo.gl/W98Nc4>.
- Rasal, R.M., Janorkar, A.V. and Hirt, D.E. (2010). Polylactic acid modifications. *Progress in Polymer Science.* 35(3): 338-356.
- Reiter, B.; Bürgmann, H.; Burg, K. & Sessitsch, A. Endophytic nifH. (2003). gene diversity in African sweet potato. *Can. J. Microbiol.* 49: 549-555.
- Rizo, C. y Montealegre, V. (2015). Biorremediación. <https://goo.gl/TmeRLJ>
- Rodríguez, A. (2012). Biodegradabilidad de materiales bioplásticos. *Ciencia y tecnología de alimentos.* (Sept. – dic): 69-72. <http://www.iiia.edu.cu/revista/index.php/RCTA/article/view/275/244>.
- Russell, J.; Huang, J.; Anand, P.; Kucera, K.; Sandoval, A.; Dantzler, K.; Hickman, D.; Jee, J.; Kirmovec, F.; Koppstein, D.; Marks, D.; Mittermiller, P.; Núñez, S.; Santiago, M.; Townes, M.;

- Vishnevetsky, M.; Williams, N.; Núñez, M.; Boulanger, L.; Bascom, C. & Strobel, S. (2011). Biodegradation of Polyester Polyurethane by Endophytic Fungi. *American society for microbiology. Applied and environmental microbiology*, 77(17): 6076-6084. <https://goo.gl/S59yP1>.
- Sánchez, E.; Mejía, M.; Serrato, A.; Reyes, A.; Estrada, Y. & Valencia, A. (2016). Antifungal activity and molecular identification of native strains of *Bacillus subtilis*. *Agrociencia*, (febrero-marzo): 133-148.
- Sangiorgio, P.; Verardi, A.; Dimatteo, S.; Spagnoletta, A.; Moliterni, S.; Errico, S.; (2022). *Tenebrio molitor* in the circular economy: a novel approach for plastic valorisation and PHA biological recovery. *Environ Sci Pollut Res Int*. 29(3): 4785. doi:10.1007/s11356-021-15944-6
- Santamaría, I. (16 de marzo de 2016). Hongo descomponedor de plástico. Los porqués de la naturaleza. <http://losporquesdelanaturaleza.com/hongo-descomponedor-de-plastico/>
- Segura, D.; Noguez, R. y Espín, G. (2007). Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables. *Revista Biotecnología*, 14, CS3.
- Sowmya, H.; Ramalingappa, B.; Nayanashree, G.; Thippeswamy, B. & Krishnappa, M. (2015). Polyethylene Degradation by Fungal Consortium. *International Journal. Environmental Research*. <https://goo.gl/aWdFJ9>.
- Téllez, A. (2012). La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: Una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá (Tesis de posgrado). Universidad Nacional de Colombia.
- Veethahavya, S.; Rajath, K.; Sabike, B.; Manoj, Kumar. (2016). Biodegradation of low-density polyethylene in aqueous media. *Proc. Environ. Sci.*, 35: 709-713. <https://doi.10.1016/j.proenv.2016.07.072>
- Velázquez, J.; Bárcenas, S.; Franco, E.; Gámez, J.; Onofre, O. y Maspoch, M. (2014). Estudio de la relación estructura-propiedades-procesamiento de nanocompuestos basados en poli (ácido láctico) (PLA) y o-MMT. *Revista Cubana de Química*, XXVI. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543737001>.
- Vigilante, A. (2009). Trabajo de campo: Polímeros. El Cid Editor. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecauniboyacasp/reader.action?docID=3180721&query=copolimeros+-de+plastico>.

- Villa, C., Rivera, D., Capilla, V. y Gardé A. (2008) Degradación biológica de polímeros mediante la selección y producción de potenciales cultivos iniciadores. CIMNE.
- Wilkes RA, Aristilde L. (2017). Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges. *J Appl Microbiol.* 123(3): 582-593. doi: 10.1111/jam.13472.
- Weng, Y.X., Jin, Y.J., Meng, Q.Y., Wang, L., Zhang, M. & Wang, Y. Z., (2013). Biodegradation behavior of (PBAT), (PLA), and their blend under soil conditions. *Polym Test.* 32(5): 918-926.
- Wu WM, Criddle CS. Characterization of biodegradation of plastics in insect larvae. (2021). *Methods Enzymol.* 648: 95-120. doi: 10.1016/bs.mie.2020.12.029.
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W., Zhao, J., Song, S., Gao, L., Yang, R. & Jiang, L. (2015). Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests. *Environmental Science and Technology.*
- 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. DOI: 10.1126/science. aad6359.