

Artículo de Revisión

Biodegradación de polímeros de plástico por Pseudomonas

BIODEGRADATION OF PLASTIC POLYMERS BY PSEUDOMONAS

MAGALI CCALLO ARELA^{§*}, FRANKLIN SACACA MASCO[§], ROSE ADELINE CALLATA CHURAC[§], JUAN EDUARDO VIGO RIVERA[§], JAEL CALLA CALLA[§]

Recibido: 27 noviembre de 2020 / Aceptado: 30 diciembre de 2020

§Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Perú

Resumen

La generación de toneladas de plásticos es uno de los problemas ambientales más severos a nivel internacional porque no se deterioran con facilidad, ni se descomponen u oxidan naturalmente con el transcurrir del tiempo por alta resistencia mecánica y por su composición química de cadenas de monómeros de carbono con presencia de aditivos que permiten tener la rigidez. El objetivo de este trabajo fue la revisión bibliográfica sobre los mecanismos, métodos y técnicas en la biodegradación de plásticos por Pseudomonas. La investigación demuestra que las Pseudomonas tienen la capacidad de asimilar los plásticos, convirtiéndolos de polímeros a monómeros y finalmente mineralizarlos en dióxido de carbono o en gas metano. Esta capacidad de asimilación de estos microorganismos se debe a la generación de enzimas que inician la ruptura de polímeros, sin embargo, estos microorganismos no solo poseen la capacidad de asimilación de los polímeros si no que se adaptan a diferentes medios y/o condiciones bióticas y abióticas con mayor facilidad que otras bacterias. Por tanto, las revisiones de literatura demuestran que las Pseudomonas son un medio ecológico de retirar del medio ambiente polímeros como: polietileno de alta densidad (HDPE) y de baja densidad (LDPE), polietileno tereftalato (PET), polietileno (PE), polipropileno (PP), poliuretano (PU), polisulfuro de fenileno (PPS), entre otros polímeros.

Palabras claves: plásticos; Pseudomonas; biodegradación de polímeros.

Abstract

The generation of tons of plastics is one of the most severe environmental problems at an international level because they do not deteriorate easily, nor do they decompose or oxidize naturally over time due to their high mechanical resistance and their chemical composition of carbon monomer chains with the presence of additives that allow them to have the rigidity. The objective of this work was the review of the mechanisms, methods and techniques in the biodegradation of plastics by Pseudomonas. The research shows that Pseudomonas have the capacity to assimilate plastics, converting them from polymers to monomers and finally mineralizing them in carbon dioxide or methane gas. This assimilation capacity of these microorganisms is due to the generation of enzymes that initiate the breakdown of polymers, however, these microorganisms not only have the capacity to assimilate polymers but also adapt to different media and/or biotic and abiotic conditions more easily than other bacteria. Therefore, literature reviews show that Pseudomonas are an ecological means of removing polymers such as: high density polyethylene (HDPE) and low density polyethylene (LDPE), polyethylene terephthalate (PET), polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyurethane (PU), polyphenylene sulfide (PPS), among other polymers, from the environment.

Keywords: plastics; Pseudomonas; biodegradation of polymers

*Correspondencia de autor: E-mail: magalicalloarela@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la generación excesiva de residuos plásticos forma uno de los más grandes problemas ambientales de la presente década, siendo el plástico uno de los desechos más comunes a nivel mundial (Meza, 2013). Awasthi *et al.* (2020) mencionan que el avanzado crecimiento del sector industrial, el del plástico, ha formado una parte relevante en la vida cotidiana por el uso que se le da, propiciando problemas ambientales de gran impacto, debido a que estos productos son de difícil degradación, ya que no se oxidan ni se descomponen naturalmente con el transcurrir del tiempo. A nivel mundial se genera alrededor de 8 300 millones de toneladas de plásticos, de los que solo el 9% son reciclados, el 12% son incinerados y el 79% son acumulados en vertederos o entornos naturales (Moreno, 2018).

Zheng *et al.* (2005) refieren que los plásticos sintéticos que constituyen cerca del 79% del uso total son tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano (PUR); cuyas propiedades físicas como la resistencia mecánica y su composición química de enlaces de carbono hacen que su degradación pueda tardar entre 100 e incluso hasta 600 años según Alania & Pérez (2017). También, su permanencia en los ecosistemas puede ocasionar muerte de animales terrestres y acuáticos por consumo o atrapamiento. Del mismo modo, Vijaya & Reddy (2008) mencionan que el enterramiento de las bolsas de polietileno en el suelo provoca fenómenos como la obstrucción del agua y provocando la pérdida de la fertilidad de suelos para cultivos.

La degradación microbiana de los plásticos se presenta como una alternativa ecológica para solucionar el problema de estos residuos a diferencia de la incineración, la degradación microbiana presenta condiciones de operación que no serían drásticas ni costosas (Shabbir *et al.*, 2020). Así mismo Olaquibe (2016), indica que en la degradación microbiana intervienen diferentes microorganismos que tienen una gran diversidad catabólica, que son capaces de degradar, transformar, sintetizar y acumular de forma natural un amplio rango de compuestos: desde ligninas, almidón, celulosa y hemicelulosa hasta hidrocarburos, fármacos y metales (Butrón, 2020).

Gupta & Rana (2016) determinaron que la actividad de biodegradación de las colonias bacterianas con el método designado “zona clara” mediante el uso de polvo del polietileno de baja densidad (LPDE). La zona de aclaramiento se detectó mediante el uso de solución de azul de coomassie, 7 aislados demostraron resultados positivos para la zona clara alrededor de las colonias bacterianas, los aislados bacterianos se identificaron como *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp. y *Micrococcus* sp. Begum & Umamageswari (2015) realizaron aislamientos bacterianos y encontraron *Desulfotomaculum nigrificans* y *Pseudomonas alcaligenes*, determinando que las *Pseudomonas alcaligenes* poseía un 20.1% de degradación más efectivo que *Desulfotomaculum nigrificans* (16.2%) a los 30 días a 37 °C en la pérdida de peso de las bolsas de polietileno.

Las condiciones óptimas para la degradación del polietileno van en relación de la temperatura y el pH, asimismo el medio mineral de crecimiento a pH 6.5. Así pues, se encontró que para la *Pseudomona putida* a un trabajo de agitación a 180 rpm, 37°C, por 7 días y a una presencia de 0.9% de polietileno ha mineralizado a CO₂ utilizando como fuente de carbono a los grupos O-H, C-O y C-H (Jalawi & Saraf, 2015). Por lo tanto, el presente

trabajo tiene por objetivo, realizar una revisión bibliográfica sobre los mecanismos, métodos y técnicas para la biodegradación de plásticos por pseudomonas.


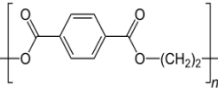


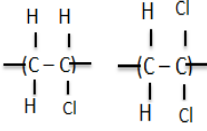

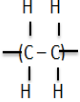

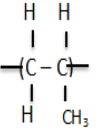

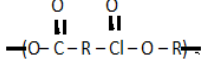
Forma primaria	Abreviatura	Símbolos de reciclaje	Propiedades	Estructura
Poliétileno tereftalato	PET		Pertenece al grupo poliéster que se obtiene por policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. La mayoría de las diferencias entre el polietileno lineal y el ramificado tienen que ver con la alta cristalinidad del polietileno lineal; el polietileno lineal tiene una alta temperatura de transición vítrea (T _g) y temperatura de fusión (T _m), alto intervalo de reblandecimiento, mayor dureza y resistencia a la tracción.	
Poliétileno de alta densidad	HDPE		Relativamente inestable a la luz o al calor resistente al fuego; resistente a los productos químicos, a los insectos, a los hongos; resistente a la humedad	$(-CH_2-CH_2-)_n$
Cloruro de polivinilo	PVC		Dependen del peso molecular. la ramificación, la distribución de pesos moleculares, etc.; buena tenacidad y flexibilidad en un amplio margen de temperaturas, propiedades eléctricas sobresalientes, buena transparencia en películas finas, químicamente inerte, resistente a ácidos y bases, se envejece al exponerlo a la luz y al oxígeno, baja densidad, flexible sin plastificantes, resiliente, alta resistencia al desgarro, resistente a la humedad.	
Poliétileno de baja densidad	LDPE		De los plásticos es el más ligero; su gran cristalinidad le confiere una elevada resistencia a la tracción, rigidez y dureza, brillo, alta resistencia al deterioro; su alto intervalo de reblandecimiento permite la esterilización del material; buenas propiedades eléctricas, es químicamente inerte y resistente a la humedad.	
Polipropileno	PP		Alta T _g elevada T _m , buenas propiedades mecánicas hasta 175°e, buena resistencia a los disolventes y al ataque químico, buena resistencia a la abrasión, baja absorción a la humedad, alto módulo de elasticidad.	
Poliestireno	PS			

Figura 1. Clasificación de plásticos (Seymour, 2013; Defalla, 2016).

POLÍMEROS DE PLÁSTICO

Son compuestos químicos con moléculas juntas en cadenas largas con repetición debido a su estructura, estos poseen propiedades únicas que pueden acopiarse para distintos usos. Sus macromoléculas están conformadas por monómeros unidos por enlaces covalentes (Yuan *et al.*, 2020). Gutiérrez (2018) menciona que existen polímeros naturales y artificiales, además que el polímero más común en la tierra es la celulosa, los cuales se encuentran en las paredes de las plantas y los polímeros artificiales y sintéticos incluyen materiales como polietileno y poliestireno. De acuerdo con Meza (2013), indica que algunos polímeros sintéticos son flexibles como los termoplásticos, que a su vez se clasifican en siete grupos los cuales son el polietileno de tereftalato (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y otros.

Los polímeros se pueden clasificar de acuerdo con el tamaño de su molécula o según su estructura orgánica e inorgánica, el estado físico, la composición química, el uso final o la reacción que tiene con el ambiente. De acuerdo con Posada (2012), la principal división de los polímeros son plásticos y elastómeros que se muestra en la Figura 1.

BIODEGRADACIÓN

La biodegradación es un proceso natural que descompone un material en dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), agua (H_2O) y constituyentes orgánicos, a causa de la acción enzimática de los microorganismos (Gama, 2014). Por otra parte, Barbarán *et al.* (2018) mencionan que la biodegradación es la asimilación de los polímeros por los organismos vivos. Y de acuerdo con Blanco (2007), la biodegradación se evidencia mediante la colonización de bacterias y hongos en la superficie del polímero, dependiendo de los factores como la tensión superficial, porosidad, textura superficial, etc.

También, Speight (2011) afirma que la biodegradación se debe a la alteración de la estructura física o química de la cadena del polímero que, a su vez, minimiza el peso molecular del polímero, dichas variaciones pueden ser indeseables como los cambios durante el uso o deseables como en la biodegradación, que se producen principalmente por el efecto de factores en la composición de los polímeros, como se observa en la Figura 2.

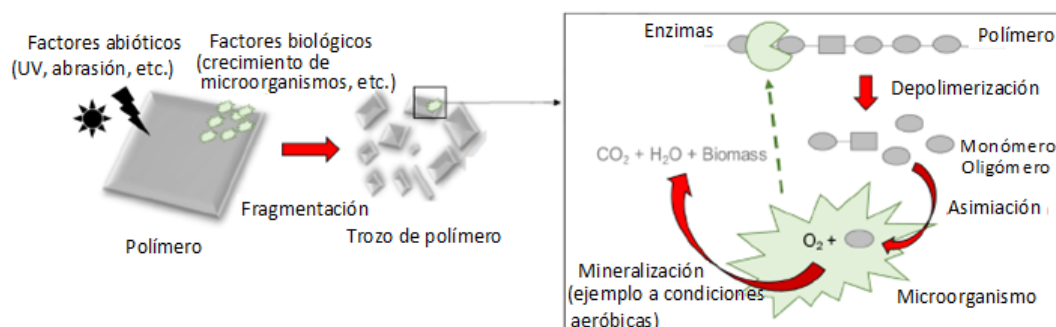


Figura 2. Biodegradación de un polímero (Audrey, 2019).

Una manera simple y rápida de evaluar la biodegradación de los polímeros es a través de la determinación de la pérdida de peso, el cual es detectado sobre dicho polímero, el mismo que muestra deterioro en su integridad, producto de un ataque microbiano (Vertus *et al.*, 2017). Por otra parte, la degradación polimérica sigue en el siguiente orden PE >LDPE>HDPE, hasta alcanzar la mineralización a CO₂ (Arutchelvi *et al.*, 2008).

FACTORES QUE AFECTAN LA BIODERADACIÓN

Cristalinidad

Genera estabilidad térmica y química, así las regiones cristalinas dan rigidez y resistencia mientras que las amorfas dan flexibilidad y tenacidad a los polímeros (Coreño, 2010).

Flexibilidad de la cadena y fuerzas intermoleculares

Polímeros muy flexibles con fuerzas intermoleculares débiles no cristalizarán, como es el caso del polisiloxano, el cual es altamente flexible por la presencia de átomos de oxígeno en la cadena principal en cada unidad repetitiva (Coreño, 2010).

Estereorregularidad

Si un H de cada unidad repetitiva del PE es sustituido por otro átomo o grupos de átomos, su regularidad puede perderse dependiendo de la colocación de estos grupos en la cadena. El orden relativo de dichos grupos a lo largo de la cadena se llama tacticidad (Coreño, 2010).

Ramificaciones

Disminuyen la estabilidad térmica dependiendo de la longitud de estas. Polímeros ramificados se oxidan más fácilmente debido a que sus carbonos terciarios son susceptibles de ataque químico; además hay menos fuerza (Gómez, 2018).

Entrecruzamiento

Aumenta la rigidez del polímero y por tanto estabilidad térmica y química (Gómez, 2018).

MICROORGANISMOS BIODERADADORES

La biodegradación se da a través de procesos metabólicos y enzimáticos de los microorganismos como: bacterias, hongos, etc., quienes secretan enzimas que se encargan de fragmentar la estructura molecular de las cadenas carbonadas en dióxido de carbono o metano, esto con el tiempo (Tokawa, 2009). Los microorganismos actúan de forma individual, colonias o en consorcios microbianos, desarrollando un papel importante en el ecosistema y a su vez están estrechamente relacionados con la biodegradación de plásticos sintéticos, naturales y biodegradables (Sha & Fariha 2008). Así mismo las bacterias representan un grupo importante de microorganismos que trabajan en forma multidisciplinaria sobre el polietileno y son los más abundantes de todos los organismos, estas habitan principalmente en el suelo, agua y la atmósfera, muchas especies son destacadas por su capacidad degradadora de contaminantes (Bakir *et al.*, 2014) y que para llevar a cabo el estudio sobre la biodegradación de plásticos en diferentes condiciones ambientales es

preciso aislarlos de sus medios y de esta forma investigar las vías metabólicas y la susceptibilidad a ataques de microbios en comparación con otros materiales degradables (Janssen *et al.*, 2002).

Las enzimas son causantes directas e indirectas de la oxidación biótica de plásticos, estas son secretadas por las células microbianas, las cuales catalizan la formación de una o varias reacciones en la superficie como: la oxidación, reducción, hidrólisis y esterificación (Acuña, 2017); algunas de las exo-enzimas presentadas, usan oxígeno o peróxido para generar grupos carbonilo o hidroxilo en la superficie del material (Kershaw, 1998). En la Tabla 1, se observa los reportes de una enzima y microorganismos degradadores.

Tabla 1. Condiciones ambientales en las que se desarrolla los microorganismos, hongos y enzimas que biodegradan los polímeros

Enzimas, hongos, bacterias, consorcios microbianos	Condiciones	Material biodegradado	Biodegradación	Referencias
Amidasa (Enzima)	37°C, pH 7 y 51 días	PU	33% de 4g	(Magnin <i>et al.</i> , 2019)
<i>Pseudomona aeruginosa</i>	20°C a 40°C, pH 5.5 a 9, 7 días	LPDE	67% de 7g	(Gutierrez, 2018)
<i>Pseudomona aeruginosa</i>	25°C, pH 7 y 35 días	LPDE	10.3% de 4g	(Martínez, 2016)
<i>Ideonella sakaiensis</i>	37°C, MSM, 160 días	PET	14.9% de 2g	(Gómez & Oliveros, 2016)
<i>Pseudomonas</i> sp.	26°C a 28°C, pH 7, 14 días	Fenantreno	56.9% de 0.2g	(Janbandhu & Fulekar, 2011)
<i>Bacillus</i> sp.	26°C a 28°C, pH 7, 14 días	Fenantreno	45.3% de 0.2g	(Janbandhu & Fulekar, 2011)
<i>Streptococci</i> sp.	26°C a 28°C, pH 7, 14 días	Fenantreno	23.2% de 0.2g	(Janbandhu & Fulekar, 2011)
<i>Aspergillus</i> sp. (hongo)	26°C a 28°C, pH 7, 14 días	Fenantreno	15.3% de 0.2g	(Janbandhu & Fulekar, 2011)
<i>Mucor</i> sp. (hongo)	26°C a 28°C, pH 7, 14 días	Fenantreno	18.9% de 0.2g	(Janbandhu & Fulekar, 2011)
<i>Rhodococcus rhodochrous</i>	27°C, 85% humedad, MSM, 6 meses	PET	5% de 0.5g	(Hakkarainen & Albertsson, 2004)
<i>Cladosporium cladosporoides</i>	27°C, 85% humedad, MSM, 6 meses	PET	8% de 0.5g	(Hakkarainen & Albertsson, 2004)
<i>Nocardia asteroides</i>	27°C, 85% humedad, MSM, 6 meses	PET	4% de 0.5g	(Hakkarainen & Albertsson, 2004)

PSEUDOMONAS

Los microorganismos del género *Pseudomonas*, son bacilos Gram negativos, aerobios, oxidasa positivos con una cierta facilidad de adaptación que les permite adecuarse al hábitat donde se encuentren para hacer uso de diferentes fuentes como el carbono o el nitrógeno para su nutrición (Fernández, 2012). Estos microorganismos se han caracterizado por ser crófilas y mesófilas, muchas de estas suelen desarrollarse en un rango de 2 °C a 42 °C de temperatura y debido a su capacidad de adaptación en el medio ambiente. Las *pseudomonas*, se han convertido en un problema para la salud pública, ya que estos microorganismos son capaces de colonizar un amplio rango de nichos, como el cuerpo humano así lo mencionan (Estupinán *et al.*, 2016).

La clasificación taxonómica es de género *Pseudomonas*, tiene como división a la proteobacteria, de clase gammaproteobacterial, en el orden pasteurellales - pseudomonales y perteneciente a la familia pasteurellaceae – Pseudomonadaceae (Pescador, 2013).

Las *pseudomonas* son usadas para procesos de biorremediación (Tabla 3), ya que tienen la capacidad de utilizar como parte de su metabolismo al carbono, se han realizado diversas investigaciones con el objetivo de introducir nuevas metodologías que puedan ser aplicados en la reducción de plásticos (González *et al.*, 2013).

Tabla 2. Condiciones ambientales para el desarrollo de las pseudomonas

Microorganismo	Condiciones	Polímero	Biodegradación	Referencia
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	25°C y 35°C, pH 5 y 7 por 30 días	LDPE	27.3% de 0.024 mg	(Butron, 2020)
<i>Deinococcus thermus</i>	25°C, pH 6.8 por 60 días	PP, PE y PET	25%, 35% y 28% de 2.0 g	(Shabbir <i>et al.</i> , 2020)
<i>Pseudomonas putida</i>	25°C y 35°C, pH 6 y 8 por 7 días	PP	51.5 % de 5 g	(Yang <i>et al.</i> , 2020)
<i>Pseudomonas sp.</i>	60°C, 24 h por 10 días	PPS y PE	10% de 2 g	(Li <i>et al.</i> , 2020)
<i>Pseudomonas sp.</i>	27°C, MSM por 70 días	LDPE	2.88% de 6g	(Gutiérrez, 2019)
<i>Pseudomona aeruginosa</i>	Solución salina y UFC	PET	19.93% de 35g	(Barbarán <i>et al.</i> , 2018)

PSEUDOMONAS GENÉTICAMENTE MODIFICADAS

El papel biodegradador de las pseudomonas resulta ser efectivas en distintos casos; sin embargo, las que son modificadas genéticamente tienen una mayor capacidad para sobrevivir a factores ambientales adversos (Torres, 2003). El análisis del genoma KT2440 reveló características de adaptabilidad de la *Pseudomona putida* y su aplicabilidad a la biorremediación (Silby *et al.*, 2011).

MECANISMOS DE LA BIODERADACIÓN DEL PLÁSTICO

Son procesos químicos (oxidación, hidrólisis), físicos (degradación térmica, fotodegradación y degradación mecánica) y procesos biológicos (biodegradación con microorganismos).

Proceso biológico de la biodegradación es complejo que se inicia de múltiples formas recorriendo varios procesos o reacciones, así la biodegradación del polietileno de baja densidad (LDPE) se da a través de dos mecanismos básicos como: la hidrobiodegradación y la oxobiodegradación (Song *et al.*, 2015). En la degradación del polímero se utilizan mezclas de aditivo para mejorar, como: el almidón que tiene amilosa y amilopectina que aumenta la enlongación y permite mayor cristalinidad de la mezcla, asimismo se tiene a aditivos pro-oxidantes que son compuestos poliinsaturados, iones metálicos de transición y complejos de tiocarbamatos que ayudan con la aceleración de la degradación (Acuña, 2017; Gómez & Oliveros (2016).

La mineralización del polietileno inicia degradación abiótica u oxidación, que es causada principalmente por la luz solar y las condiciones del entorno como el: pH, la salinidad, la disponibilidad de oxígeno, el estrés físico, la humedad, la temperatura, etc., facilitando el posterior ataque microbiano (Janbandhu & Fulekar, 2011).

FACTORES AMBIENTALES QUE INTERVIENEN EN LA BIODERADACIÓN

Es importante tener en cuenta que la biodegradación depende de varios factores como las características del plástico, tipo de microorganismo y la fase de pretratamiento. Arutchelvi *et al.* (2008), Figura 3, mencionan que la biodegradabilidad de los polímeros está determinada esencialmente por diferentes e importantes características físicas y químicas como: la disponibilidad de grupos funcionales que aumentan las propiedades hidrofílicas, forma, peso, peso molecular, densidad del plástico, cantidad de regiones amorfas y cristalinas del polímero, de igual forma Shabbir *et al.*, (2020) menciona la complejidad estructural del plástico, composición molecular, presencia de grupos fácilmente fragmentables como los grupos éster o amidas como lo menciona Zheng *et al.* (2005).

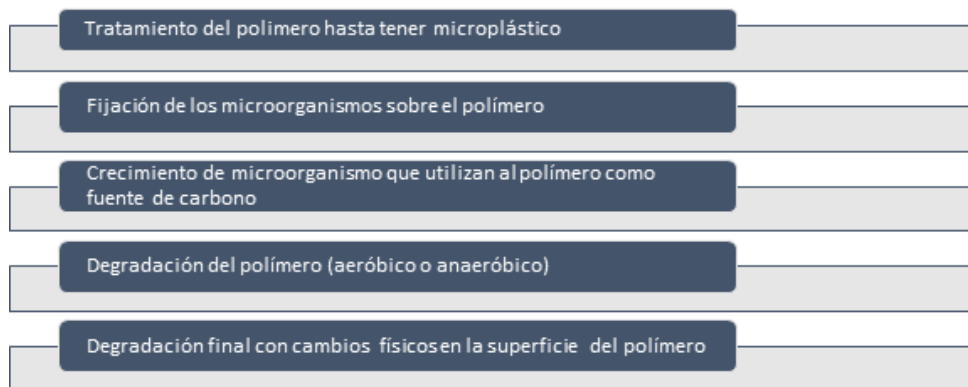


Figura 3. Mecanismo de la biodegradación de los plásticos (Arutchelvi *et al.*, 2008)

Humedad

El contenido de humedad en el sustrato tiene un efecto directo en el crecimiento de los microorganismos. La presencia de la humedad se clasifica en dos categorías: ambientes acuáticos y ambientes sólidos o secos (Hakkarainen & Albertsson, 2004). La degradación del polietileno de baja densidad por *Pycnoporus sanguineus* mostró un crecimiento más rápido y de forma intensa en el sustrato compuesto por 67% de polímero y 33% a 22% en presencia de mayor humedad (Acuña, 2017).

pH

En la degradación, el pH varía entre 6 a 8; sin embargo, en algunas bacterias presentan amplios rangos de tolerancia de cambio de pH de 5 a 10 con tolerancias a cambios de pH bajo y alto (Acuña, 2017). Esmeralda *et al.* (2008) mencionan el efecto del pH en el medio, este factor es uno de los indicadores del proceso de biorremediación y aunque las pseudomonas pueden adaptarse fácilmente a condiciones extremas, estas cepas microbianas tienen un determinado rango de tolerancia.

Temperatura

La temperatura más apropiada es variable según al tipo de especie bacteriana que puede fluctuar entre 28 a 55 °C (Acuña, 2017) en el grupo del tipo termófilico. Alania & Pérez (2017) mencionan el efecto de la temperatura de desarrollo de las pseudomonas corresponde a los valores de los 2 °C hasta 55 °C en general, las bacterias termofílicas como las *Streptomyces coelicoflavus* soportan variaciones de temperaturas de 12 a 42 °C; no obstante, la temperatura óptima que observaron fue de 28 ± 2 °C. Por otro lado, para *Pseudomonas putida* determinaron que la temperatura óptima de desarrollo es de 37 °C; además, Yang *et al.*, (2020) afirman que *Pseudomonas* sp. es euritérmicos, es decir, que estos son capaces de adaptarse a los cambios, lo cual hace que estas bacterias, sean las mejores alternativas para la aplicación de biodegradación en diferentes condiciones ambientales de temperatura.

ANÁLISIS DE LA BIODEGRADACIÓN DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD

A través de los años se han ido desarrollando nuevas técnicas que se enfocan en el estudio de los microorganismos que utilizan el LDPE como fuente de carbono y energía, también,

los cambios que ocurren en las poblaciones microbianas a través del tiempo, las enzimas liberadas, los cambios en la biomasa a través de todas las etapas de crecimiento (Gutiérrez, 2013). A continuación, se muestran las siguientes técnicas y métodos utilizados para el presente estudio, en la Tabla 3.

Las técnicas usadas en los estudios de investigación fueron técnicas espectrofotométricas microscópicas y espectrométricas. Las cuales se basan en la interacción entre la materia LDPE y la energía, cada uno de sus átomos absorbe y refleja la energía que se emite por las distintas fuentes (Acuña, 2017).

El Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, citado por Acuña (2017) afirma que la microscopía electrónica de barrido (SEM) permite determinar la forma, textura, composición química, cambios superficiales y colonización microbiana de los polietilenos biodegradados, mediante el uso de electrones en lugar de luz para formar una imagen; así mismo, cuenta con un dispositivo que genera un haz de electrones que interactúan con la superficie PE.

Mahalaksmi, (2017) citado por Acuña (2017), indica que el Espectro fotometría infrarrojo (FTIR), nos permite determinar los enlaces de carbono y carbonilos presentes en la biodegradación del LDPE, mediante la emisión de frecuencias infrarrojo que absorben las moléculas orgánicas y así mismo dichas moléculas reflejan las frecuencias y se puede determinar en enlace que pertenece a dicha frecuencia y por consiguiente la degradación del LDPE como lo determinaron Uribe, Gutiérrez, Giraldo & Merino (2010).

La microscopía óptica nos permite conocer la microestructura de muestras biológicas e inorgánicas mediante la interacción con un haz de luz de fotones (Universitat de les Illes Balears [UIB], 2010).

Tabla 3. Métodos y técnicas utilizadas para estudiar la biodegradación del LDPGE.

Microorganismo	Método	Técnica	Condiciones de biodegradación, tipo de PE.	% biodegradación	Referencia
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Pérdida de peso.	M.O.	25°C y 35°C, pH 5 – 7, mg 0.021 – 0.024, 30 días, LDPE	27.3%	(Butrón, 2020)
<i>Pseudomonas sp.</i>	Pérdida de peso.	SEM, FT-IR	60°C, 24h por 10 días, 2g de PE y PPS	10%	(Li <i>et al.</i> , 2020)
<i>Pseudomonas putida</i> .	-----	M.O. MS-MS	25°C – 35°C, pH 6-8, MSM, 7 días, 5 g de PP	51.5%	(Yang <i>et al.</i> , 2020)
<i>Deinococcus th.</i>	Pérdida de peso.	SEM, FTIR-ATR	25°C, pH 6.8, 60 días, 2g de PP, PE y PET	25%, 35% y 28%	(Shabbir <i>et al.</i> , 2020)
<i>Pseudomonas sp.</i>	Pérdida de peso.	SEM	27°C, MSM, 70 días, 6g de LDPE	6.54%	(Gutiérrez Alvarez, 2019)
<i>Rhodococcus rh,</i> <i>Cladosporium cl,</i> <i>Nocardia as.</i>	-----	SEM, FT-IR	20°C a 40°C, 85% humedad, MSM, inóculos, por 6 meses, 4g de PET.	4% a 8%	(Hakkarainen & Albertsson, 2004)
<i>Pseudomonas sp.</i> <i>Streptococcus sp.</i> <i>Diplococcus sp.</i>	UFC	ASTM D882 y D5899-96	30°C por 12 meses, HDPE, LDPE	11.54% 10.47% 2.87%	(Vijaya & Reddy, 2008)
<i>Pseudomonas chororaphis</i>	UFC	Kalb y Bernlohr (1977).	30 °C, 12 – 18 horas, pH 7 – 8.5, PS	2.8%,	(Ruiz <i>et al.</i> , 1999)

Según Acuña (2017), existe una amplia gama de métodos que permiten estudiar la biodegradación del PE incluso algunos fueron estandarizados por la Organización Internacional de Estandarización, estos tienen múltiples propósitos, que pueden enfocarse en los microorganismos, la biodegradación o los productos de la biodegradación.

Vertus *et al.* (2017) mencionan que los métodos desarrollados por diversos autores se enfocan en aspectos subjetivos de interés tales como las condiciones antes y durante los experimentos, en tiempo que serán expuestos a los microorganismos, y Li *et al.*, (2020) agrega que las variables a analizar durante la experimentación son, el tipo de material a biodegradar, los microorganismos que serán utilizados para la biodegradación, entre otras variables que se consideran a evaluar.

“Para la biodegradación del LDPE se debe tener en cuenta las siguientes variables, tipo de microorganismos, la disponibilidad de oxígeno, disponibilidad de agua, temperatura, ambiente químico, pH, enzimas, consorcios microbianos, etc.” (Acuña, 2017).

PRODUCTOS DE LA BIODEGRADACIÓN

Los estudios demuestran que los microorganismos toman a los polímeros sintéticos y lo reducen a micromoléculas, más fáciles de metabolizar y mineralizar los cuales se enlistan a continuación, benceno, metilo benceno, docosanoato de metilo propilo, undecano, octano, elcosanol, docosano, tetracosano, pentacosano, hexacosano, ciclo propano, acetona, ácido acético, tricosano y otros (Awasthi *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

La degradación de polímeros por bacterias permite la mineralización de este por ser cadena polimérica de carbono, y el método de microscopía óptica permite evidenciar las fragmentación y cambios en la estructura de los polímeros sintéticos de manera más sencilla.

Así mismo es de importancia el tipo de polímero en la mineralización en CO₂ y agua en procesos aeróbicos; por otra parte, las bacterias liberan enzimas que fraccionan a la cadena polimérica en monómeros que son mineralizados.

Referencias

- Acuña Molina, N. R. (2017). Revisión Bibliográfica sobre los microorganismos biodegradadores de polietileno de baja densidad y sus efectos en la materia. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2010.02280.x>
- Alania Vilcachagua, Y. M., & Pérez Romero, S. G. (2017). Efecto de la temperatura en el crecimiento de dos cepas ATCC de *Pseudomonas* sp. expuestas a polipropileno. Universidad Peruana Cayetano Heredia. Recuperado de <https://docplayer.es/94219006-Tesis-para-optimar-por-el-titulo-profesional-de-licenciado-en-tecnologia-medica-especialidad-laboratorio-clinico.html>
- Anzola, J., & Netlogo, M. A. (2014). Detección e identificación de islas de calor urbano: un acercamiento desde el estado del arte. *Detección e identificación de islas de calor urbano: un acercamiento desde el estado del arte*, 11(2), 127–139.

<https://doi.org/10.14483/2322939X.9726>

- Awasthi, A. K., Tan, Q., & Li, J. (2020). Biotechnological Potential for Microplastic Waste. *Trends in Biotechnology*, xx(xx), 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.03.002>
- Barbarán Silva, Hellen Maripaz. Cabanillas Paredes, Lilian Janet. Rubio Rodriguez, Y. E. (2018). Biodegradación de polietileno tereftalato (PET) por acción de *Pseudomonas aeruginosa*, en condiciones de laboratorio. Universidad Cesar Vallejo. Recuperado de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_44689f90593842836b69665e0df7c682/Details
- Bustos F., C. (2010). La problemática de los desechos sólidos. *Economía*, 0(27), 121–144.
- Butrón Pinazo, S. B. (2020). Capacidad de Biodegradación de *Pseudomonas aeruginosa* frente al polietileno de baja densidad. Universidad Nacional del Altiplano. Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/13475>
- Cáceres Azurin, O. (2012). Biodegradación bacteriana de polietileno de baja densidad bajo condiciones controladas en biorreactores Air Life. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Recuperado de <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/356>
- Calzada, E. O. (2016). Aplicación de Percepción Remota para el Estudio de Áreas con un Potencial Geotérmico. Recuperado de <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/20/1/64-2016-Tesis-Edgar Omar Calzada Iglesias-Maestro en Geomática.pdf>
- Chunga Campos, L. del R., & Cieza Martínez, C. A. (2017). Biodegradación de poliestireno utilizando microorganismos presentes en el humus de lombriz durante los meses, octubre-diciembre 2016. Universidad de Lambayeque. Recuperado de [http://repositorio.udl.edu.pe/bitstream/handle/UDL/83/CHUNGA CAMPOS, LOURDES DEL ROSARIO ok.pdf;jsessionid=D638FD33F0B8475D442C6F6F28BF315C?sequence=3](http://repositorio.udl.edu.pe/bitstream/handle/UDL/83/CHUNGA_CAMPOS, LOURDES DEL ROSARIO ok.pdf;jsessionid=D638FD33F0B8475D442C6F6F28BF315C?sequence=3)
- Coreño Alonso, Juan y Méndez Bautista, María Teresa (2010). Relación estructura - propiedades de polímeros.
- Di Martino, C. (2015). Estudio de bacterias del género *Pseudomonas* en la degradación de hidrocarburos y síntesis de biosurfactantes: análisis del efecto de los polihidroxicanoatos. Universidad de Buenos Aires. Recuperado de https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n5752_DiMartino
- Esmeralda, S., Romero, G., Carolina, D., Bustos, G., María, A., Marín, H., ... Vargas, M. (2008). *N Document* 1, 6(9), 76–84.
- Fernández Escapa, I. (2012). Estudio del metabolismo de polihidroxicanoatos en *Pseudomonas putida*: Implicaciones fisiológicas y aplicaciones en el desarrollo de bioplásticos funcionalizados. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad de Complutense. Madrid, España. Universidad Complutense de Madrid. Recuperado de <http://www.tdx.cat/handle/10803/90999>
- Ferrelli, F., Bustos, M. L., & Piccolo, M. C. (2016). La expansión urbana y sus impactos sobre el clima y la sociedad de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. *Estudios Geograficos* 77(281), 469–489. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201615>
- Fuentes Pérez, C. A. (2014). Islas de calor urbano en Tampico, México. Impacto del microclima a la calidad del hábitat. *Nova Scientia*, 7(13), 495. <https://doi.org/10.21640/ns.v7i13.41>
- Gómez, J., & Oliveros, C. (2016). Biodegradación de polietileno de tereftalato por microorganismos

- aislados de sitios de disposición final de residuos sólidos, Táchira, Venezuela. *Redieluz*, 6(4), 57–62.
- Gómez Méndez, Luis D. (2018). Transformación física, química y microbiológica de polietileno de baja densidad (PEBD) empleando plasma de Oxígeno, fotocatalisis TiO₂/UV y *Pleurotus ostreatus*. Tesis Doctoral.
- González, J. J. G., Carrión, I. N. C., & Juárez, J. (2013). Efecto de la temperatura y del pH sobre el crecimiento de *Pseudomonas aeruginosa* MBLA-04 en solución mínima de sales con detergente Ace. *Revista Rebiol*, 33(1), 1–8. Recuperado de <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/faccbbiol/article/view/167>
- Gorni, A. (2015). Introducao Aos Plásticos. ResearchGate, xxx(January), 18. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/266178341_INTRODUCAO_AOS_PLASTICOS
- Gutiérrez Alvarez, A. I. (2019). Biodegradación del polietileno de baja densidad utilizando hongos, bacterias y consorcios microbianos aislados del botadero municipal de Tacna. Universidad Privada de Tacna. Recuperado de <http://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/UPT/1269/1/Gutierrez-Alvarez-Ana.pdf>
- Gutierrez Taipe, K. Y. R. (2018). Influencia de factores ambientales de crecimiento microbiano en la degradación de polietileno de baja densidad por la bacteria pseudomona aeruginosa en Huancayo. Universidad Continental. Recuperado de <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/4507>
- Hakkarainen, M., & Albertsson, A. C. (2004). Environmental degradation of polyethylene. *Advances in Polymer Science*, 169(March 1991), 177–199. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00129-0)
- Howard, G. T. (2002). Biodegradation of polyurethane: A review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 49(4), 245–252. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00051-3)
- Huamani Montesinos, C., Tudela Mamani, J. W., & Huamaní Peralta, A. (2020). Gestión de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca-Puno-Perú. *Journal of High Andean Research*, 22(1), 49–56. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.541>
- Janbandhu, A., & Fulekar, M. H. (2011). Biodegradation of phenanthrene using adapted microbial consortium isolated from petrochemical contaminated environment. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1–3), 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.034>
- Janczak, K., Hryniewicz, K., Znajewska, Z., & Dąbrowska, G. (2018). Use of rhizosphere microorganisms in the biodegradation of PLA and PET polymers in compost soil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 130, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.017>
- Li, J., Kim, H. R., Lee, H. M., Yu, H. C., Jeon, E., Lee, S., & Kim, D. H. (2020). Rapid biodegradation of polyphenylene sulfide plastic beads by *Pseudomonas* sp. *Science of the Total Environment*, 720, 24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137616>
- Li, Z., Tang, B., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., ... Sobrino, J. A. (2013). Remote Sensing of Environment Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Martínez, P. N. (2016). Efectos de las Asociaciones Microbianas sobre la Degradabilidad del Polietileno de Baja Densidad. *Estudios e Investigaciones del Saber Académico*, 10, 13–18. Recuperado de <http://publicaciones.uni.edu.py/index.php/eisa/article/view/104>
- Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo* (2020) 6(2):46-59

- Méndez, C. R., Vergaray, G., Béjar, V. R., Cárdenas, K. J., Nacional, U., De, M.-Y., ... Carmen Méndez, E. (2007). Aislamiento y caracterización de micromicetos biodegradadores de polietileno. *Revista Peruana de Biología*, 13(3), 203–205. Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/rpb/v13n3/v13n03a08.pdf>
- Meza Vargas, M. F. (2013). Biodegradabilidad de polietileno tereftalato y de oxopolietileno, a nivel de laboratorio, por la acción de bacterias nativas presentes en humus de lombriz, caballo y gallina. Escuela politécnica del ejército. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/6261>
- MINAM. (2010). Informe anual de residuos sólidos municipales y no municipales en el Perú, gestión 2009. Perú. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/informe-anual-residuos-solidos-municipales-no-municipales-peru>
- Mujabar, P. S. (2019). Spatial-temporal variation of land surface temperature of Jubail Industrial City , Saudi Arabia due to seasonal effect by using Thermal Infrared Remote Sensor (TIRS) satellite data. *Journal of African Earth Sciences*, 155(March), 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.03.008>
- Obeso Rodríguez, J. I. (2017). Síntesis de polihidroxialcanoatos en *Pseudomonas putida*: estudios bioquímicos, genéticos y ultraestructurales. Universidad de León. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=125059>
- Olaquibe, M. A. (2016). Estudio de la capacidad degradativa sobre materiales plásticos de microorganismos aislados del lixiviado del relleno sanitario de la ciudad de Santa Fé. Santa Fe.
- Olcina Cantos, J., Rico Amorós, A. M., Moltó Mantero, E., Paulo Gomes, W., & Trindade Amorim, M. C. de C. (2016). Análisis de la isla de calor de superficie en la ciudad de Ubatuba, Brasil. *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio*, 19(band 10), 121–129. <https://doi.org/10.14198/xcongresoaealicante2016-11>
- Palao Villasante, A. S., Nuñez Delgado, E. J., & Delgado, N. (2014). Modelo de sistema de información de registro y monitoreo socio ambiental participativo del proyecto de exploración minero Chucapaca comparando las metodologías ágiles Scrum y Kanban, 120.
- Pescador Gutiérrez, G. J. (2013). Biodegradación de polietileno de baja densidad por consorcios microbianos. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/tesis/tesis_gutierrez_pescador.pdf
- Porras Vásquez, P. (2018). Detección de núcleos de islas de calor en la Ciudad de Arequipa, 58. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3204>
- Posada Bustamente, B. (2012). La degradación de los plásticos. *Revista universidad Eafit*, 30, 67–86. Recuperado de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>
- Sangines-Coral, D. E. (2013). Metodología de evaluación de la isla de calor urbana y su utilización para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana, 2008. <https://doi.org/2254-7606>
- Shabbir, S., Faheem, M., Ali, N., Kerr, P. G., Wang, L. F., Kuppusamy, S., & Li, Y. (2020). Periphytic biofilm: An innovative approach for biodegradation of microplastics. *Science of the Total Environment*, 717, 43. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137064>

- Silby, M. W., Winstanley, C., Godfrey, S. A. C., Levy, S. B., & Jackson, R. W. (2011). *Pseudomonas* genomes: Diverse and adaptable. *FEMS Microbiology Reviews*, 35(4), 652–680. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2011.00269.x>
- Seymour, R.aimond B. y Carraher, Jr., Charles E. (2013). *Introducción a la química de los polímeros*. Editorial Reverte, S.A.
- Soberón Forsberg, V. S., & Obregón Párraga, E. (2016). Identificación De Islas De Calor En La Ciudad De Lima Metropolitana Utilizando Imágenes Del Satélite Landsat 5Tm. *Anales Científicos*, 77(1), 34. <https://doi.org/10.21704/ac.v77i1.475>
- Soberón, V. S. (2014). Islas de calor urbanas en la ciudad de Lima utilizando imágenes satelitales.
- Song, C., Wang, S., Meng, Z., Qiao, M., & Takeuchi, S. (2015). Estimation of the Number of Degrading Microorganisms for Biodegradable Plastic in Natural Environments. ResearchGate, (February), 9. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/268412137_ESTIMATION_OF_THE_NUMBER_OF_DEGRADING_MICROORGANISMS_FOR_BIODEGRADABLE_PLASTICS_IN_NATURAL_ENVIRONMENTS
- Soto, J., Garzón, J., & Jiménez-Cleves, G. (2020). Análisis de islas de calor urbano usando imágenes Landsat: caso de estudio Armenia-Colombia 1996-2018. *Espacios*, 41(8), 9. Recuperado de <https://www.revistaespacios.com/a20v41n08/20410809.html>
- Torres, D. (2003). 54012219. *Ecosistemas*, XII(2), 5.
- Urbano, C. (s. f.). *Curso: Contaminación Atmosférica Tema : Isla de Calor Urbano*.
- Uribe, D., Giraldo, D., Gutiérrez, S., & Merino, F. (2010). Biodegradation of low density polyethylene by the action of a microbial consortium isolated from a landfill, Lima, Peru. *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 133–136.
- Vertus, D., Ruíz, M., Henriquéz, J., & Ortíz, V. (2017). Biodegradación bacteriana de polietileno y propuesta de aplicación en Cerro Patacón. *Revista de Iniciación Científica*, (1): 3(1), 1–6. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/318315747_Biodegradacion_bacteriana_de_polietileno_y_propuesta_de_aplicacion_para_Cerro_Patacon
- Wilkes, R. A., & Aristilde, L. (2017). Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges. *Journal Applied Microbiology*, 123(3), 582–593. <https://doi.org/10.1111/jam.13472>
- Yang, Y., Pratap Singh, R., Song, D., Chen, Q., Zheng, X., Zhang, C., ... Li, Y. (2020). Synergistic effect of *Pseudomonas putida* II-2 and *Achromobacter* sp. QC36 for the effective biodegradation of the herbicide quinclorac. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 188(October). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109826>
- Yuan, J., Ma, J., Sun, Y., Zhou, T., Zhao, Y., & Yu, F. (2020). Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics. *Science of The Total Environment*, 715, 9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136968>
- Zheng, Y., Yanful, E. K., & Bassi, A. S. (2005). A Review of Plastic Waste Biodegradation. *Critical Reviews in Biotechnology*, 25(4), 243–250. <https://doi.org/10.1080/07388550500346359>