

**Degradación del polietileno de baja densidad mediada por hongos filamentosos:
Una revisión sistemática**

**Adriana Sofia Banguera
Patricia Rangel hoyos**

Directora:

Mg. Luz Dary Caicedo Bejarano

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Microbiología
Cali, Colombia
2023**

**Degradación del polietileno de baja densidad mediada por hongos filamentosos:
Una revisión sistemática**

**Adriana Sofia Banguera
Patricia Rangel hoyos**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Microbióloga

Directora:

Mg. Luz Dary Caicedo Bejarano

Línea de Investigación:

Biotecnología

Grupo de investigación:

Micología

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Microbiología
Cali, Colombia
2023**

**Degradación del polietileno de baja densidad mediada por hongos filamentosos:
Una revisión sistemática**

BANGUERA O. Adriana Sofia¹;RANGEL H., Patricia¹;CAICEDO B., Luz Dary¹

¹Grupo de investigación Micología, Facultad de Ciencias Básicas,
Universidad Santiago de Cali, Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00, Santiago de
Cali, Colombia,
adriana.banguera00@usc.edu.co, patricia.rangel00@usc.edu.co, ludcaice@usc.edu.co

RESUMEN

El polietileno de baja densidad (LDPE), se utiliza en la industria de alimentos, ropa, transporte, construcción y medicina. Es un material de alto consumo y debido a su naturaleza fisicoquímicas son extremadamente duraderos, recalcitrantes, relativamente irrompibles y podrían estar presentes por más de 50 años en el medio ambiente. Su acumulación genera graves daños de contaminación afectando los recursos naturales, amenazando la fauna, la vida silvestre y hasta la salud pública. En la mayoría de los vertederos los desechos plásticos representan las fracciones más grandes, alcanzando hasta el 25% en peso en algunos sitios. La degradación del LDPE se puede dar por métodos químicos, físicos y biológicos, los cuales se pueden ver afectados por la temperatura, la luz UV y por acciones enzimáticas de microorganismos tanto bacterias como hongos. En los estudios de biodegradación, los hongos son considerados candidatos potenciales para la degradación del LDPE, debido a su capacidad para adherirse a la superficie del polímero y la producción de enzimas intra y extracelulares. En esta revisión se reportan hongos aislados a partir de vertederos de basura ricos en LDPE con capacidad biodegradativa de este polímero. Algunos hongos que se reportaron fueron del género *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* entre otros. Para la medición de la biodegradación usaron las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR) y aunque hay otras revisiones, sobre el tema hay poca información de hongos extraídos de vertederos de basuras usados para la biodegradación de LDPE.

Palabras claves: Hongos, LDPE, vertederos, degradación, revisión sistemática.

ABSTRACT

Low-density polyethylene (LDPE), is used in the food, clothing, transportation, construction, and medical industries. It is a high-consumption material and due to its physicochemical nature is extremely durable, recalcitrant, relatively unbreakable, and could be present for more than 50 years in the environment. Their accumulation generates serious pollution damage affecting natural resources, threatening fauna, wildlife, and even public health. In most landfills plastic waste represents the largest fraction, reaching up to 25% by weight in some sites. Degradation of LDPE can occur by chemical, physical, and biological methods, which can be affected by temperature, UV light, and enzymatic actions of both bacterial and fungal microorganisms. In biodegradation studies, fungi are considered potential candidates for LDPE degradation, due to their ability to adhere to the polymer surface and the production of intra- and extracellular enzymes. This review reports fungi isolated from LDPE-rich landfills with LDPE biodegradative capacity. Some fungi reported were of the genus *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*, among others. Scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) techniques are used to measure biodegradation and although other reviews have been analyzed, there is little information on fungi extracted from landfills used for LDPE biodegradation.

Keywords: Fungi, LDPE, biodegradation mechanisms, degradation, systematic review

INTRODUCCIÓN

Los plásticos son productos poliméricos orgánicos, y en la mayoría de los casos se derivan de productos petroquímicos [1]. En los últimos 30 años, los materiales de plástico se han utilizado ampliamente en la industria de alimentos, ropa, transporte, construcción, y medicina. Siendo un material flexible, liviano, duradero y de bajo costo [2]. La generación mundial de residuos plásticos es de aproximadamente 57 millones de toneladas anuales [3]. En 2014, la producción de plástico alcanzó los 311 millones de toneladas y se espera que se duplique en 20 años y se cuadruplique para el año 2050 [4]. Entre los residuos sólidos urbanos (RSU) se encuentran una mezcla de diferentes tipos de plásticos, como: poliestireno (PS), (PP), polietileno (PE), policloruro de vinilo (PVC), polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), poliestireno expandido (EPS) y plásticos de tereftalato de polietileno (PET) [5]. El polietileno (PE), es un polímero semicristalino y flexible, cuyas propiedades están influenciadas por la cantidad relativa de fases amorfa y cristalina [6]. PE de alta densidad (PEAD), es un polímero lineal y con una cristalinidad relativamente alta [5]. A comparación del polietileno de baja densidad (LDPE), que tiene largas cadenas de carbono, que van desde 20-40 ramas por cada 1000 átomos C-H que permiten determinar el grado de cristalinidad de la molécula, con un valor de 50-60%, no mayor al polietileno de alta densidad (HDPE) [7,8]. Y el polietileno de baja densidad (LDPE), es fabricado con un material ligero, de alta transparencia y

con capacidad para retener la humedad [8]. Es un material elástico, suave, liviano y está hecho de monómeros de etileno [9]. Además, tienen varias aplicaciones, se pueden usar en la fabricación de contenedores, botellas dispensadoras, juguetes, tubos, bolsas de plásticos y diversos equipos de laboratorio moldeados [10]

En la mayoría de los vertederos, los desechos plásticos representan las fracciones más grandes, alcanzando hasta el 25% de peso en algunos sitios [11]. Se ha estimado que el 5-7% de los residuos domésticos que llegan a los vertederos de basura son de este polietileno de baja densidad (LDPE) [12]. Otake (1995) y Awasthi (2017) reportan que el impacto de la contaminación por ingestión y atrapamiento del plástico, afectan al menos a más de 243 especies de fauna marina, que van desde el zooplancton, cetáceos, las aves y los reptiles [13,14]. Además, las sustancias tóxicas asociadas a los plásticos como los plastificantes, colorantes y retardantes de llama se transfieren a los tejidos y órganos a través de la ingestión, asociándose de esta forma a la red alimentaria, afectando la fauna, flora silvestre y la salud humana, provocando daños hormonales, problemas de crecimiento, diversos tipos de cáncer, entre otras complicaciones [15].

Existen diversos métodos actualmente empleados para la degradación del LDPE, que van desde los métodos químicos, físicos y biológicos [16]. La degradación del polietileno se puede clasificar en procesos abióticos o bióticos, el primero es provocado por factores ambientales, como la temperatura o la radiación ultravioleta, y el segundo se caracterizan por la degradación provocada por la acción de microorganismos como bacterias, algas y hongos [17]. La degradación de plásticos utilizando microorganismos, se reporta como una opción de tendencia debido al bajo consumo de energía y mayor estabilización de los biosólidos resultantes, tanto los hongos como las bacterias son los grupos microbianos más utilizados para degradar polímeros sintéticos [10]. En la mayoría de los estudios, los hongos se han considerado candidatos potenciales para la degradación del LDPE, debido a su capacidad para adherirse a la superficie del polímero mediante la síntesis de proteínas hidrofóbicas. Además, los hongos pueden crecer más rápido que las bacterias a temperatura ambiente [6,17,18]. Para la biodegradación de polímeros, se han utilizado especies de hongos como: *Rhizopus arrhizus*, *Penicillium simplicissimum*, *Aspergillus flavus*, *Penicillium funiculosum*, *Aspergillus niger*, *Penicillium funiculosum*, *Fusarium*, *Pestalotiopsis microspore*, *Curvularia senegalensis* y *Fusarium solani* [19]. El polímero es descompuesto enzimáticamente y es absorbido por la célula microbiana para ser metabolizado. Se ha investigado la participación de las enzimas en la biodegradación microbiana del polietileno y se ha confirmado que enzimas como lacasa (Lc) y manganeso peroxidasa (MnP) desempeñan un papel en este proceso [20].

Los siguientes estudios muestran que se han publicado revisiones con hongos aislados en diferentes matrices. Rodrigo (2021) evaluó la capacidad de tres cepas de hongos (*Penicillium*, *Geomices*, *Mortierella*) aislados de la antártida usando el PU (poliuretano) como única fuente de carbono, la cepa fúngica que produjo la mayor degradación del poliuretano fue *Penicillium Spp* [18]. Ibrahim (2011) realizó un estudio de 6 cepas de hongos (*Fusarium solani*, *Alternaria solani*, *Spicara Spp*, *Aspergillus fumigatus*, *A. terreus*, y *A. flavus*), las cuales fueron seleccionadas para la degradación del poliéster-poliuretano (PS-PUR), pero la máxima actividad de degradación se logró mediante el hongo *Aspergillus flavus*, que provocó una pérdida de peso del 94% en las piezas de PSPUR [21]. Passos (2015) demostró la capacidad del hongo *P. variotii* para adherirse a la superficie del polihidroxibutiratocovalerato (PHBV) provocando cambios significativos en la morfología [22]. Kim (2000) estudió el comportamiento de degradación de tres plásticos

biodegradables comerciales como el poli-3-hidroxi-butarato (PHB), Sky-Green 1(SG), *Penicillium simplicissimum*, *A. fumigatus* y *Paecilomyces* demostraron mayor tasa de degradación [23].

Entre las técnicas más usadas, que estudie el polímero después de ser sometido a un proceso de biodegradación, está la microscopía electrónica de barrido (SEM). La cual estudia la parte física del polímero, evidenciando el deterioro superficial del material (LDPE), mostrando un patrón de crecimiento microbiano [25]. Otra técnica muy utilizada es la espectrofotometría por transformada de Fourier (FTIR), que permita analizar la degradación del polietileno por fotooxidación, evidenciando la aparición de grupos carbonilos que se dan mediante rayos ultravioleta (UV), temperatura, enzimas oxidantes de microorganismos, etc. Formando grupos carboxílicos, los cuales experimentan la oxidación que es catalizado por microorganismos [29]

Hasta el momento no se han realizado revisiones sistemáticas de hongos aislados a partir de vertederos de residuos sólidos, ricos en LDPE o aplicados posteriormente para la degradación de este polímero. Por lo anterior, se realizó esta revisión sistemática con el fin de responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué géneros y especies de los hongos aislados a partir de vertederos de residuos sólidos, han informado como más eficientes en la degradación del polietileno de baja densidad (LPDE), y que metodologías se han utilizado para hacer el seguimiento de esta biodegradación?

Para tratar de resolver esta pregunta de investigación, se planteó como objetivo. Determinar mediante una revisión sistemática, cuáles son los géneros y especies de hongos aislados en diversos vertederos de residuos sólidos, que presentan mayor capacidad de biodegradación del polietileno de baja densidad (LPDE).

MATERIALES Y METODOS

Estrategia de la búsqueda

Se realizó una búsqueda sistemática de la literatura científica, con base a la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses*). La cual adopta métodos explícitos para la selección, identificación y evaluación objetiva de la información.

Criterios de elegibilidad

Se establecieron criterios de inclusión y de exclusión para establecer los límites de la búsqueda sistemática. Se incluyeron aquellas bases de datos indexadas, artículos completos, en los idiomas inglés y español, dentro de los años 2000 y 2022. Seleccionando aquellos

estudios de tipo cualitativo o cuantitativo, que nos proporcionaran información relacionada con la diversidad de hongos degradadores del LDPE en vertederos de residuos sólidos.

Se excluyeron aquellos artículos científicos o revisiones sistemáticas, enfocados en bacterias o animales degradadoras del polietileno de baja densidad (LDPE). Aquellos artículos de un idioma diferente al inglés o el español. Aunque estuvieran entre el límite de años establecidos. También se excluyeron documentos divulgados en otras fuentes de información, como tesis, libros, poster o conferencias.

Búsqueda de la información

Para garantizar la sensibilidad, los artículos científicos fueron seleccionados utilizando las siguientes palabras claves a partir de la pregunta de investigación: “Biodegradation”, “LDPE”, “microorganisms”, “fungi”, “low density polyethylene”, “polyethylene” y “landfills”. Por especificidad se diseñó un protocolo de búsqueda con los operadores booleanos, utilizando la combinación de las palabras claves: Biodegradation AND plastics AND (microorganisms OR fungi) / Biodegradation AND fungi AND low density polyethylene / Metabolisms AND fungi AND polyethyl AND landfills.

Como base de datos especializada se utilizó, Science direct, Taylor & Francis, Springer y Pubmed. Se utilizó google scholar como literatura gris. Las rutas de especificidad de búsqueda son las siguientes:

Extracción, tabulación y gestión de datos

Los artículos encontrados y de mayor relación con el tema, fueron exportados con el gestor de referencias bibliográficas EndNote. Que pudo organizar en un listado las diferentes bibliografías encontradas en las cuatro bases de datos. Además, se utilizó la herramienta de Excel Microsoft para la organización de la información suministrada en los artículos, a nivel de tablas y gráficos. Se utilizó Visme.co (online), para la organización de los países en el mapa mundial. De manera que se ingresan a la plataforma, donde hay un mapa ya organizado y se agregan los nombres de los países.

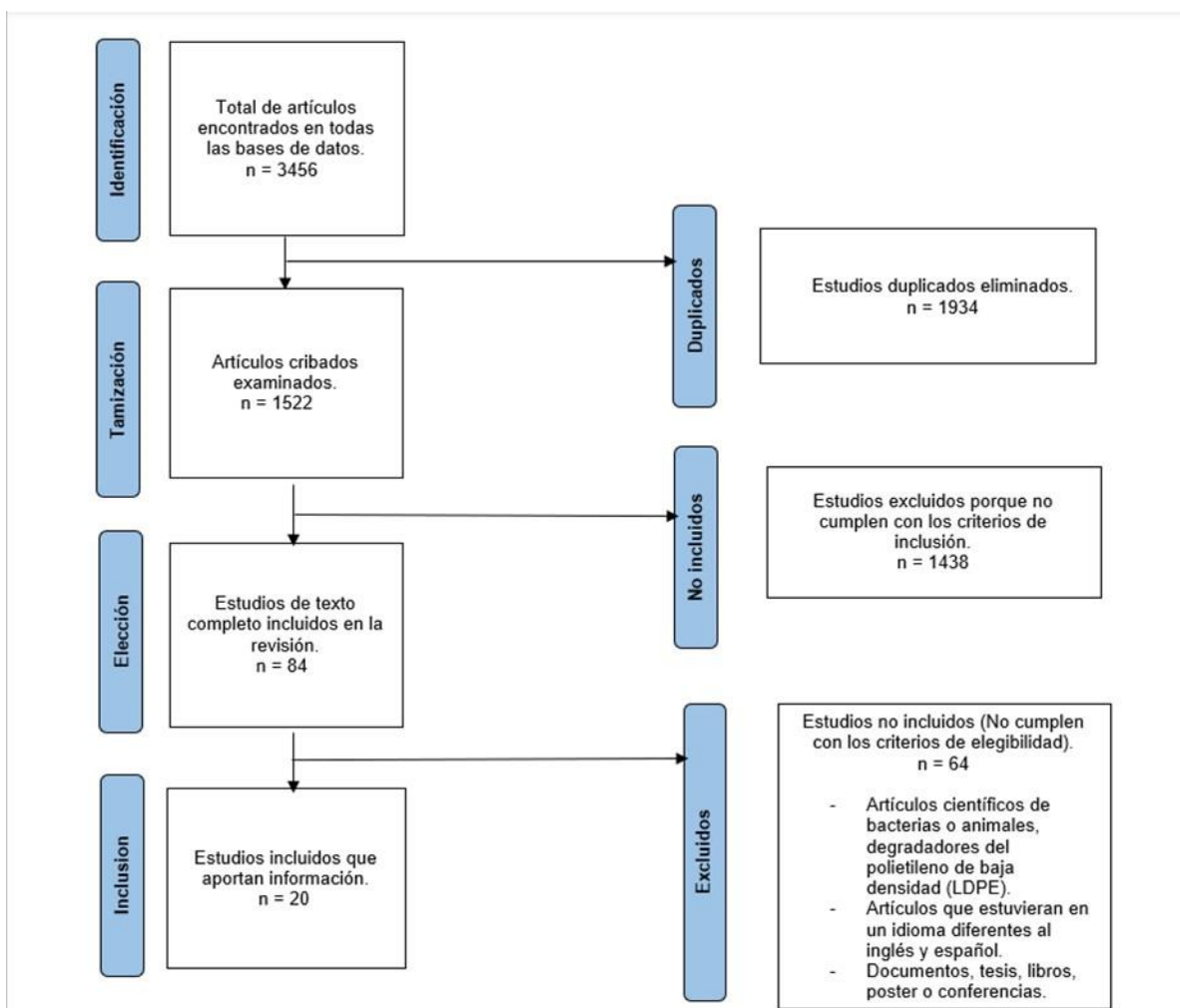
Estudio de calidad metodológica

Se realizó el estudio detallado de cada una de las referencias seleccionadas, siguiendo los parámetros de inclusión y la especificidad de los artículos. Por medio del título, resumen y palabras claves se determinó la calidad de la información del texto y se descartaron los que no cumplen con los criterios de inclusión. Las variables principales fueron: 1) Tipo de hongo y enzima, 2) Tipo de polietileno y 3) Método y técnicas de biodegradación. La información de los artículos fue recopilada en tablas y gráficos de Excel para posterior análisis.

RESULTADOS Y DISCUSION

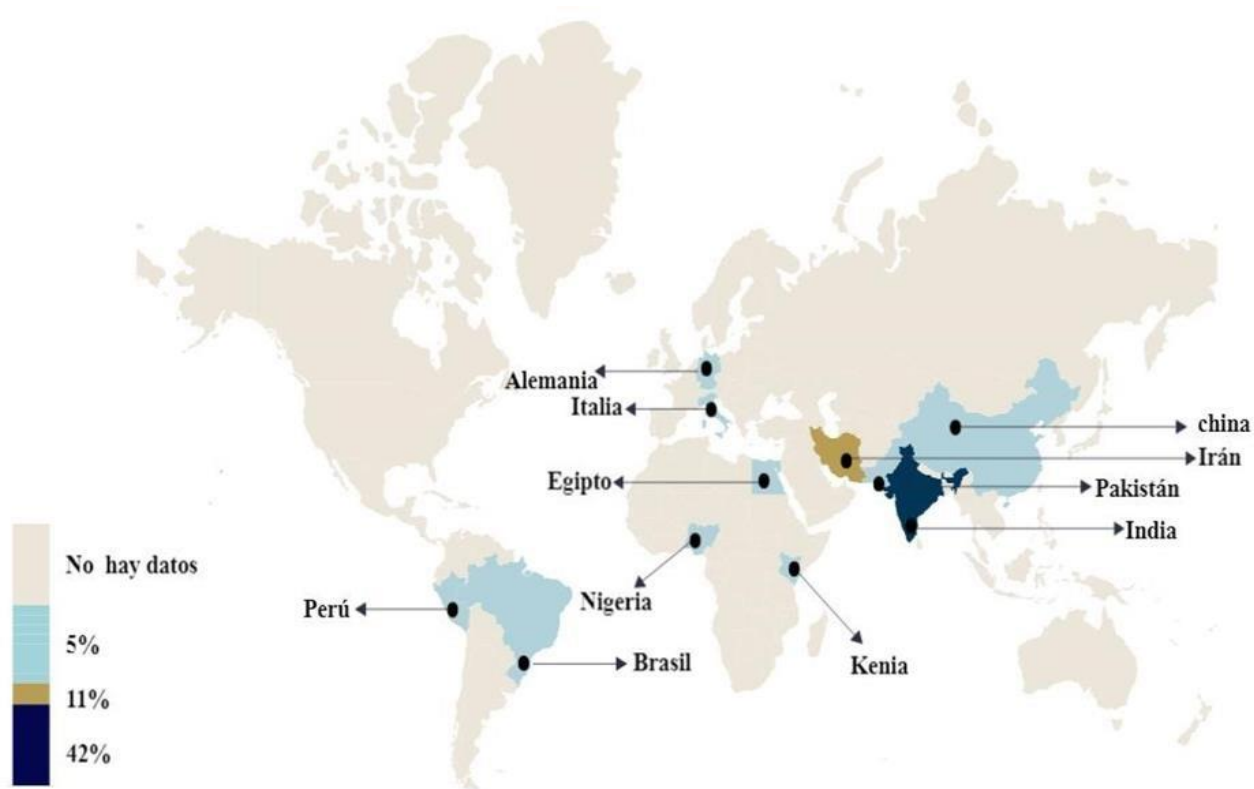
La búsqueda de artículos científicos, sobre la degradación del polietileno de baja densidad mediada por hongos, arrojó un total de 3456 artículos de texto completo y originales, entre el periodo de tiempo de 2000 y 2022, distribuidos de la siguiente manera: Literatura científica 1308 artículos y en literatura gris 2148 artículos (IOP-science, CABI, JEBA, JOCPR, Hindawi, academia.edu, y MDPI). Con ayuda del gestor de referencias Endnote se eliminaron los artículos duplicados para un valor total de 1934 artículos originales y se excluyeron un total de 1502 artículos que no cumplían con los criterios de inclusión que van relacionado con palabras claves y resumen del texto. Al final se seleccionaron un total de 20 artículos para la interpretación de los resultados como lo muestra la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA, búsqueda y selección de artículos incluidos.



Como es representado en la Figura 2, el país con mayor número de publicaciones relacionadas con la degradación del polietileno de baja densidad por hongos fue la India con 8 estudios (45%) e Irán 2 (10%), seguido de Egipto, China, Kenia, Pakistán, Brasil, Perú, Italia, Nigeria, y Alemania, con 1 estudio (5%). En la India, las ciudades que más estudios publicaron fueron Shimoga (3 estudios) y Chennai (2), otras ciudades como Bangalore, Agra, Andhra Pradesh y Telangana reportaron solo un estudio. Pakistán y Brasil reportaron un estudio por ciudad (Peshawar y Porto Alegre), también se reportaron 2 estudios de la capital de Teherán en Irán, y otras capitales como: Nairobi de Kenia y Lima de Perú solo 1 estudio.

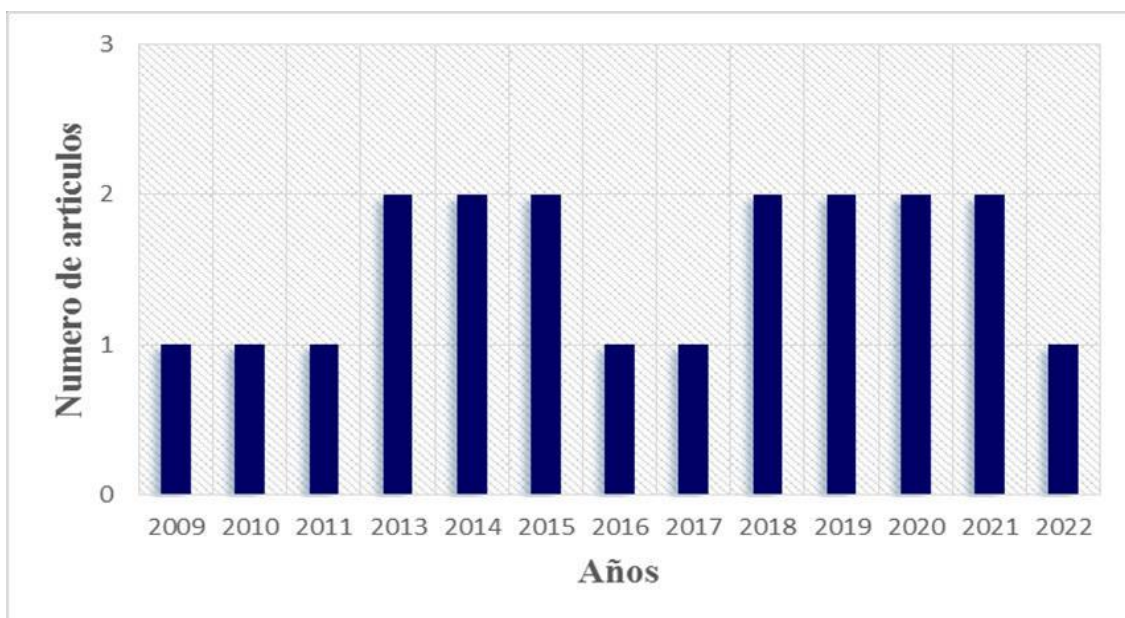
Figura 2. Cantidad de investigaciones realizadas por país, para el estudio de hongos degradadores del polietileno de baja densidad (LDPE).



Es importante resaltar que a partir del año 2009 hasta el año actual (2022), los resultados fueron similares, ya que no hay diferencia entre 1 y 2 artículos. Esto puede deberse a la falta de financiación o al poco conocimiento científico sobre los hongos biodegradadores del

LDPE en vertederos [8]. Además, se podría decir que se han reportado, al menos un estudio por año, sobre hongos biodegradadores de LDPE, lo que sugiere que, habido un mayor interés, en poder encontrar hongos que puedan degradar este material [17]. Como se observa en la fig 3

Figura 3. Cantidad de artículos sobre hongos usados como degradadores del polietileno de baja densidad (LDPE) en vertederos de residuos sólidos, con relación al año de publicación



Hongos que se consideran biodegradables del LDPE aislados de vertederos

Los vertederos municipales son utilizados para la recolección de materiales orgánicos/inorgánicos provenientes de diferentes áreas rurales o urbanas en todo el mundo. Incluso en países como Europa, donde el reciclaje se ha convertido en un método indispensable para el manejo de residuos sólidos, se utiliza de manera recurrente [23]. Sin embargo, la mayor parte de los desechos municipales en vertederos están compuestos por residuos plásticos [12]. En muchos países como, Estados Unidos (E.E.U.U), China, Japón y Alemania, el plástico representa el 31% de la matriz de los residuos. Se puede decir que aproximadamente el 50% de este material se utiliza para aplicaciones desechables de un solo uso, como lo son: Envases de alimentos, bolsas de empaque o en artículos de consumo diario [20].

Debido a la acumulación y contaminación del plástico en los diferentes ambientes, existe una alternativa del uso de los hongos, que pueden ser usados para la biodegradación de polímeros sintéticos no degradables, como el polietileno de baja densidad [25]. Sin embargo, la mayoría de los estudios realizados se han enfocado en el aislamiento, identificación y en la

determinación de su potencial como biodegradadores de LDPE, sin profundizar en las vías bioquímicas utilizadas para realizar este proceso [17].

De acuerdo con los estudios, se ha encontrado un total de 58 cepas pertenecientes a 16 géneros y 25 especies. Los géneros de mayor abundancia fueron *Aspergillus* 28 (48%), seguido de *Fusarium* 8 (14%), *Purpureocillium* 4 (7%), *Trichoderma* 2 (3%), *Penicillium* 2 (3%), *Mucor* 2 (3%) y *Byssochlamys* 2 (3%). Los hongos *Chaetomium*, *Trichaptum*, *Scedosporium*, *Pseudallescheria*, *Cladosporium*, *Talaromyces*, *Chrysosporium*, *Cladorrhinum*, *Clonostachys* y *Rhizopus*, resultaron tener la misma cantidad de especies (1), que representa el 2%. Representado en la fig 4

La mayoría de estos géneros pertenecen a la división *Ascomycota* (94%), un 5% a la división *Basidiomycota* y un 2% *Zygomycota*. La abundancia de los hongos en los vertederos de basura, se debe a la cantidad de residuos que provienen de diferentes fuentes, ya sean domésticas, agrícolas o industriales, que permiten las condiciones óptimas de crecimiento de los hongos en estos ambientes [40].

En la Figura 5 se pueden observar los géneros de hongos aislados. Los cuales han demostrado mayor eficiencia en la biodegradación de polietileno de baja densidad (LDPE). Los hongos del género *Aspergillus* representando el 38% en mayor frecuencia y capacidad para degradar el LDPE de todas las especies de hongos, seguida de otras especies como *Fusarium* (19%), *Penicillium* (10%), *Trichoderma* (10%) y *Mucor*, *Rhodotorula*, *Hyalodendron*, *Chaetomium* y *Purpureocillium* en menor cantidad (5%).

Figura 4: frecuencia relativa de los géneros de hongos aislados en verederos de residuos sólidos. Ver tabla S2 (complementaria)

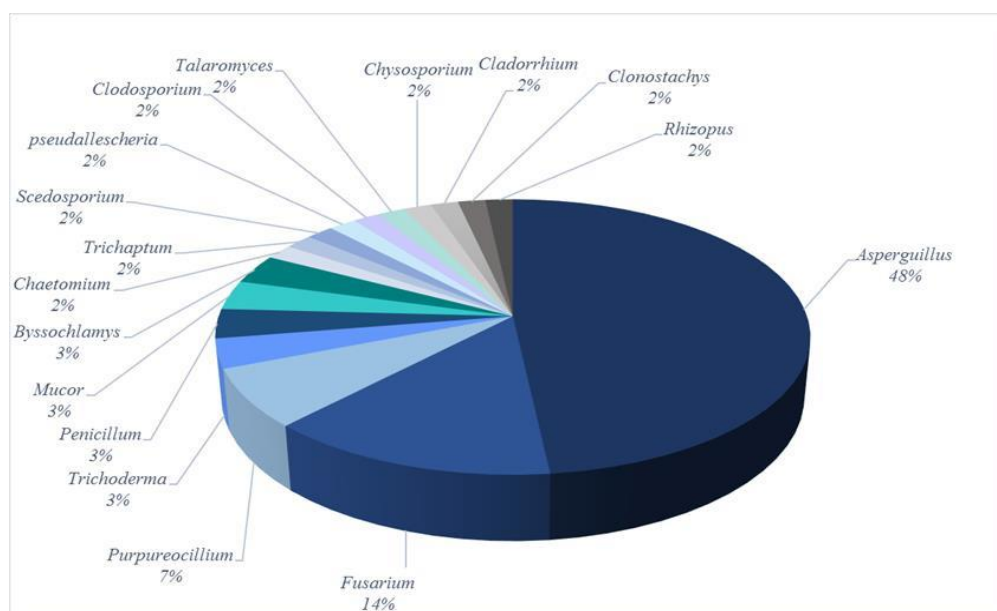
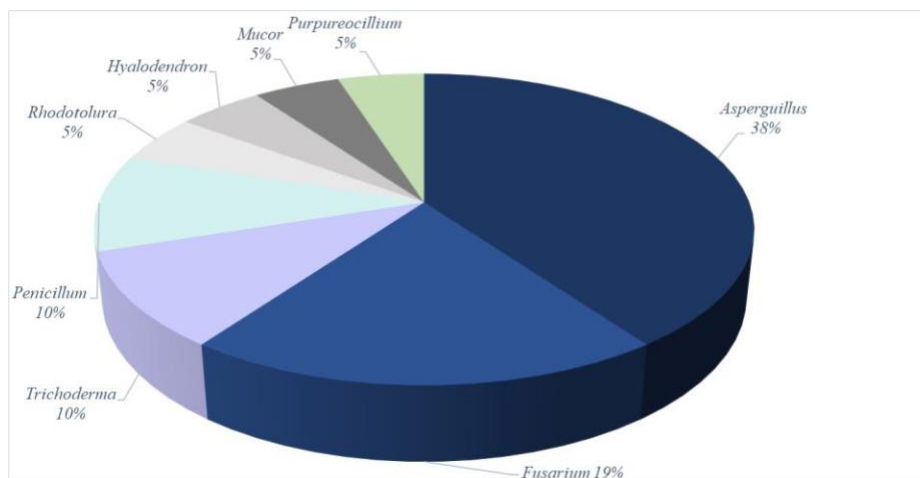


Figura 5. Frecuencia relativa de los géneros de hongos degradadores del polietileno de baja densidad (LDPE), aislados de verederos de residuos solidos. Ver tabla S3 (complementaria)



Mecanismo de biodegradación de los hongos

La biodegradación del polietileno de baja densidad por *Aspergillus spp* y *Fusarium spp*, lo logran a través de la capacidad de colonización de estos hongos en la superficie del polímero, con el fin de biodegradar el material y utilizarlo como sustrato [33].

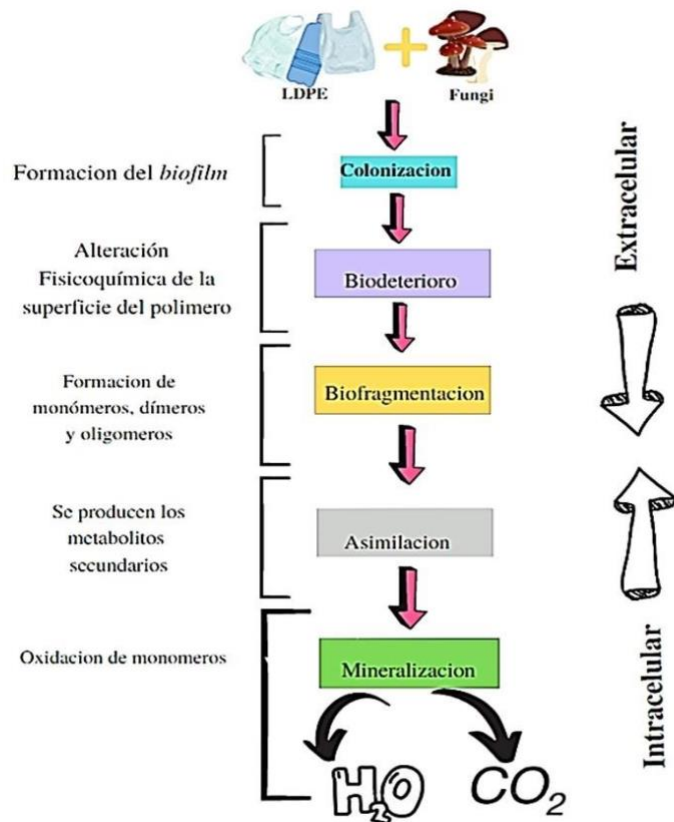
El mecanismo de acción de la biodegradación ocurre en cinco pasos: Colonización, biodeterioro, biofragmentación, asimilación y mineralización, como lo muestra la Figura 6 [28]. La primera etapa está determinada por la colonización del hongo sobre la superficie del plástico, por lo cual, los hongos forman consorcios microbianos que conlleva a un biofilm (Biopelícula de microorganismos). Luego se produce la adhesión de los microorganismos en la superficie del polímero, que conjuntamente con los factores abióticos producen diversas polisacáridos y proteínas como las hidrofóbicas (proteínas ricas en cisteína) que se infiltran en los poros del polímero provocando un aumento en el tamaño y la superficie del plástico [29,53]. Los factores abióticos solos, también pueden causar daños en el polímero, el aumento y disminución de la temperatura, la humedad o congelación, pueden generar daños mecánicos como la ruptura o el agrietamiento del material [3,28].

Continuamente la etapa del biodeterio/biodegradación, que es el resultado de la actividad metabólica de los hongo (*Aspergillus spp* y *fusarium spp*), tras la acción de las enzimas (Hidroxilasas) despolimerizas intracelulares y extracelulares [33]. El proceso intracelular, es la hidrólisis de un reservorio carbono endógeno por parte de los mismos microorganismos, en cambio la extracelular, es la utilización de una fuente carbono exógeno no necesariamente de los microorganismos. En este proceso se alteran las propiedades fisicoquímicas del

polietileno de baja densidad (LDPE) que produce la degradación superficial del polímero [30].

La biofragmentación es un proceso de lisis. Ocurre después de la acción de las enzimas extracelulares específicas como oxido-reductasas e hidroxilasas, que reducen el peso molecular del polímero en fragmentos más pequeñas, como monómeros, dímeros y oligómeros para luego ser asimilados por los hongos [47]. Además, en este proceso aumenta la concentración de enzimas en función del tiempo debido al consumo del sustrato, lo que explica el largo periodo de degradación de un plástico [34]. En cuanto a la asimilación, es este proceso donde los monómeros producidos, son absorbidos por el hongo para la obtención de energía, electrones, carbono u otros compuestos esenciales para su crecimiento. Sin embargo, algunos monómeros no logran ser asimilados por la membrana, por lo que se utilizan a través de un proceso de biotransformación donde se oxidan para producir orgánulos celulares y ATP [10,27]. Por último, el proceso de la mineralización, donde se secretan los metabolitos oxidados, se libera CO_2 y H_2O , para procesos aerobios y CH_4 , CO_2 y H_2O para procesos anaerobios, obteniendo como resultado final la formación de biogás y biomasa [27]. Lo que sugiere que los hongos pueden utilizar eficientemente el polímero como fuente de carbono para su crecimiento [29].

Figura 6. Etapas de la biodegradación del hongo hacia el polietileno de baja densidad (LDPE).



Los investigadores como Whitekettle et al. (1991) y Milstein et al. (1992) sostienen la idea de que la colonización de los polímeros se da a través de la producción de enzimas exocelulares (proteína, lípidos, ADN) compuestos primariamente de polisacáridos no iónicos y aniónicos, considerando que tal adhesión a la superficie de los sustratos es un paso decisivo de la corrosión microbiana [6,32]. Además los hongos filamentosos pueden producir hidrofobinas (proteínas de bajo peso molecular) que pueden dar hidrofobicidad a las estructuras fúngicas. Estas estructuras absorben fácilmente los ftalatos hidrófobos y como resultado facilitan la biodegradación [31].

Eficiencia de la degradación en porcentaje de pérdida de peso

La pérdida de peso del LPDE, es una medida de la eficiencia de biodegradabilidad del material, incluyendo también, aquellas impurezas volátiles y solubles de la molécula [6]. Los cambios en la pérdida de peso se dan por la acción de las enzimas y radicales libres secretadas por los hongos [33]. Se puede determinar mediante la diferencia entre el peso seco inicial y el peso seco final del polímero después de un proceso de experimentación. El porcentaje de

eficiencia de la pérdida de peso se calcula según Kavelman y Kendrick (1978), mediante la siguiente ecuación [55].

$$(\%) \text{ Eficiencia de degradación} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

Pf

Pf= Peso final del polímero

Pi= Peso inicial del polímero

Ecuación 1.

En los estudios de Gajendiran (2016,2017) y colaboradores, mostraron la mayor pérdida de peso 40.6 % y 35 % tras la acción de la cepa JASS1 de *Aspergillus versicolor* y *A. clavatus* a 90 días [33,35]. Otro estudio realizado por Muhonja (2018), demostró una reducción de peso significativa 36,4 ± 5,53 %, 24 ± 3,26 % y 18 ± 2,20 % atribuido a *A. oryzae* cepa A5,1 (MG779508), *A. fumigatus* cepa B2,2 (MG779513) y *A. nidulans* E1,2 (MG779511) a 16 semanas. Por lo tanto, se confirma que estos hongos pueden degradar el polietileno por la acción de las enzimas (Intracelulares-extracelulares) capaces de reducir progresivamente el material y el peso molecular del polímero [20,36].

Otros estudios realizados por Deepika (2015), Maroof (2022), Zahra (2009) y colaboradores, observaron una reducción de 16.45%, 18.7%, 22.5% 22.6 %, y 22.9% por acción de *Aspergillus flavus*, *A. fumigatus*, *A. terreus*, *F. solani* y *A. niger* en los discos de polietileno después de la incubación con el aislamiento durante 30 días, 100 días y 6 meses. Pero de todos, la mayor reducción peso se dio al tiempo de los 6 meses de incubación, por la acción de *A. niger* [24,37,42,50].

El investigador el-sayed (2021), Kunlere (2019), Malachová (2020) y colaboradores demostraron que la menor pérdida de peso fue de 3.8 y 0.5-1.3 % tras la acción de *Aspergillus carbonarius* y *Trichoderma hamatum* a 16 semanas y 2 meses [30,38,43]. La pérdida de peso está relacionada directamente con el área superficial del polímero por el contacto de los hongos, por lo tanto, la pérdida de LDPE es proporcional al área de la superficie ya que la biodegradación normalmente se inicia en la parte superficial del material [43,35]. Por esta razón, se afirma que la pérdida de peso está relacionada directamente con el área superficial del polímero y el contacto con los hongos. Por lo tanto, la pérdida de LDPE es proporcional al área de la superficie, ya que la biodegradación normalmente se inicia en la parte superficial del material [43,35].

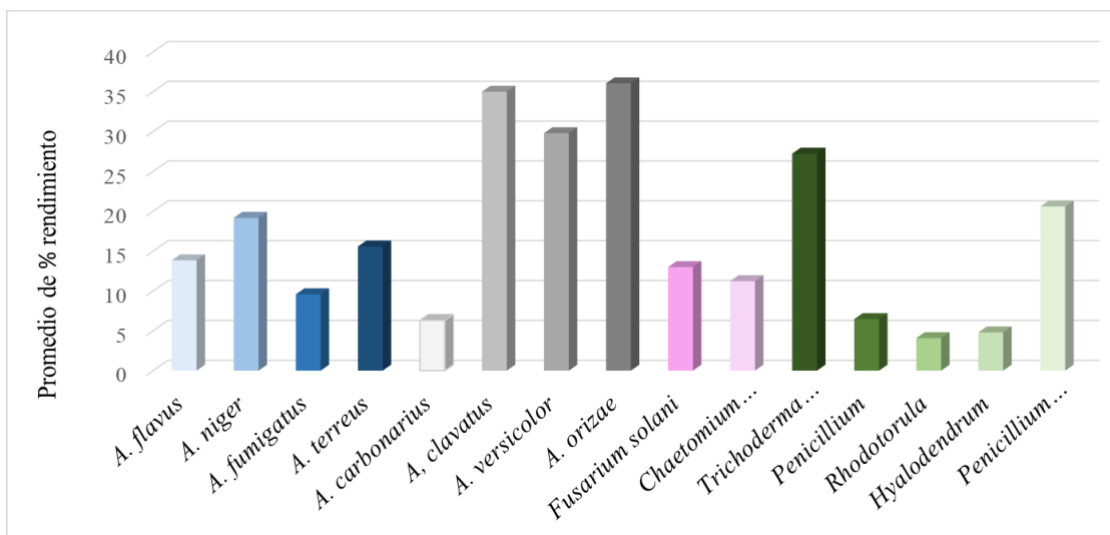
La pérdida de peso puede favorecerse a través de diferentes pretratamientos como la luz UV, temperatura (autoclave), esterilizado superficial y químico (HNO₃) y rayos gamma que modifican estructuralmente la molécula del LDPE. En otros estudios los investigadores Sowmya (2015), El-sayed (2021), Esmaeili (2013) y colaboradores pudieron evidenciar la

acción de la luz UV hacia la molécula del LDPE, donde se evidenció una pérdida 40%, 38 %, 29.5% y 21% por la acción de *Trichoderma harzianum*, *Penicillium simplicissimum*, *A. niger*, *Chaetomium globosum*. Otros pretratamiento con el mismo interés evidenciaron una pérdida de 39.1 %, 23%, 16%, 7.5% en autoclave, con los hongos *Aspergillus carbonarius* y *A. fumigatus*, *T. harzianum*, *P. simplicissimum*, *C. globosum*. En el tratamiento químico y rayos gamma se perdió un 17.76 % y 5.79% del polímero que fue tratado con un cultivo mixtos de *A. carbonarius* y *A. Fumigatus*. El LDPE tratado con esterilizado superficial dio una perdida 23%, 7.7%, 5.6 % por *T. harzianum*, , *P. simplicissimum*, *C. globosum* confirma que estos hongos pueden utilizar el polietileno sin ningún tratamiento previo de calor, UV o ácido [29,31,32,34,43].

Verma (2019) y colaboradores evidenciaron que el LDPE se redujo de 11.4% a 30.6 % en el suelo después de 9 meses. Mientras que la pérdida de peso total de LDPE en medio sintético después de 4 meses de incubación en agitador orbital fue del 13.1 % a 14.3 % para las cepas de *A. terreus* y *A. flavus* [39].

De acuerdo con los análisis de los diferentes estudios, se logró determinar 15 cepas de hongos, de los géneros *Aspergillus*, *Fusarium*, *Chaetomium*, *Trichoderma*, *Penicillium*, *Rhodotorula* y *Hyalodendrum*. Las cepas de hongos que presentaron el mayor promedio de porcentaje de biodegradación del LPDE fueron algunas especies de *Aspergillus* como *A. orizae* (36%), *A. clavatus* (35%) y *A. versicolor* (29%), seguida de *T. harzianum* (27%), *Penicillium simplicissimum* (20%), *A. niger* (19%) , *A. terreus* (15%) *A. flavus* (13%), *Fusarium solani* (13%), *A. fumigatus* (9%), *Chaetomium globosum* (11%) y con un porcentaje menor de rendimiento, *Penicillium* y *A. carbonarius* con un 6%, *Rhodotorula* y *Hyalodendrum* con un 4%. Figura 7

Figura 7. Promedio en porcentaje de remoción de las diferentes cepas de hongos aisladas de vertederos de residuos sólidos, con potencial en la biodegradación de polietileno de baja densidad (LPDE).



Consumo del LDPE por producción de CO₂

La literatura muestra que el CO₂ es uno de los principales productos emitidos durante la biodegradación del polietileno, se basa en el desprendimiento de dióxido de carbono o consumo de oxígeno cuando el hongo empieza a consumir el sustrato (LDPE) [29]. Por lo tanto, en los estudios de biodegradación del polietileno de baja densidad, se estudió el rendimiento de la degradación estimulada del CO₂, como un indicador de la actividad de los hongos hacia la película del LDPE [35,45].

Los estudios de Gajendirán (2016) demuestran una producción de CO₂ en 2.32 gl⁻¹, 11 gl⁻¹ sobre los hongos *Aspergillus clavatus* y *A. vesicular* durante 30 días [4,20]. Además, se observaron diferencias significativas en el estudio de Pramila (2011) donde la producción fue de 5.9 gl⁻¹ por el hongo *Mucor circinelloides* y 5.9gl⁻¹ respecto *A. Flavus* que evolucionó alrededor de 4.4g/L de CO₂ incubado a 1 semana [46].

Esmaeili (2013) y colaboradores, encontraron que el desprendimiento del CO₂ se debió a la utilización de grupos carbonilo de las películas irradiadas con luz ultravioleta (UV) por la cepa de *Aspergillus niger*. Alcanzando niveles de 734 mg incubados a 126 días, debió a la utilización de grupos carbonilo de las películas irradiadas con UV. Además, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, lo que indicó la capacidad del hongo para utilizar el LDPE como fuente de carbono [29].

En general todos los hongos de los diversos estudios analizados, produjeron en promedio 6.5 gl⁻¹ de CO₂. Por lo tanto, el método de evolución del CO₂ se considera viable para medir la biodegradabilidad total, es decir, la transformación del carbono orgánico total en carbono inorgánico [47]. Estos datos permiten corroborar, el hecho de la colonización de estos hongos en la superficie del plástico, por lo que CO₂ es un factor esencial para medir el metabolismo entre el hongo y sustrato (LDPE).

Pretratamientos para acelerar la degradación del polietileno de baja densidad (LDPE)

Tratamiento con irradiación ultravioleta (UV)

La fotooxidación es un proceso por el cual a través de rayos ultravioleta (UV), se pueden generar cambios sobre las estructuras poliméricas, teniendo en cuenta que las radiaciones tienen suficiente energía para romper los enlaces C-C y formar radicales oxidados (C*), por lo que la mayoría de los polímeros sintéticos son susceptibles a la degradación tras la acción de los rayos UV [33] Además, aquellos plásticos como el LDPE, se pueden degradar por la acción de la irradiación, ya sea generados por un equipo de radiación (UV) o por rayos del sol en un ambiente natural, pero para este, tardaría millones de años la degradación [45].

Mecanismo de degradación UV

El mecanismo de acción de la radiación ultravioleta (UV) está dado por cuatro etapas: Iniciación, propagación, ramificación de cadena y terminación [3]. La etapa de iniciación y propagación, está dada tras la formación de radiales libres oxidados de carbono (C*), que se liberan tras la exposición del polímero (LDPE) a los rayos ultravioleta, estos mismos reaccionan con el oxígeno para formar el peróxido radical que puede reaccionar con cualquier compuesto que ceda protones o electrones, para promover la formación de un ácido o un éster como grupo funcional [54]. La ramificación en cadena, se da tras la formación de los grupos carbonilos formados en la primera etapa. Estos actúan como cromóforos que absorben la luz UV y forman pares de radicales libres por transferencia de hidrogeno (Reacción de Norrish Tipo I y II). Los radicales de los polímeros formados, dan paso a la formación de nuevos grupos funcionales principales, como los alquenos, esterres, alcoholes y ácidos carboxílicos que son usados luego por las enzimas para el metabolismo de los hongos [55].

El-sayed y colaboradores (2021) afirman que la irradiación de luz ultravioleta hacia el LDPE se inicia a través a través de la formación de grupos carbonilos oxidados de éster, aldehído, formiato y propilo ($-COOH$, $C=O$ y $-OH$) que se producen tras la irradiación [43]. Además, Albertsson y colaboradores (1987), concluyen que al producirse los nuevos grupos carbonilos, estos luego comienzan hacer a ser utilizados por los hongos para su metabolización y crecimiento [44].

La longitud de onda (λ) de los rayos UV también es un factor influyente en la degradación del polímero [42]. Un estudio realizado por Maroof y colaboradores (2022), demostraron que la película de LDPE tratada a una longitud de onda de 360 nm que estaba a 30 mg, obtuvieron una degradación inicial de 17.4 mg antes de ser tratado con *Aspergillus niger* [31]. Después de ser tratado con el hongo e incubado a 30 días con agitación, el peso final fue de 13.4 mg, con una pérdida significativa de 4 mg. De acuerdo con lo anterior, el rango de la longitud de onda (λ), es crucial para la degradación del material, ya que produce fotodaños y debilitamiento de la molécula [31,33].

Sowmya (2014) y colaboradores demuestran que el pretratamiento con luz UV resulta ser más eficiente (21%) que el uso de la autoclave (7.5%) y el esterilizado superficial (5,6%). Esto significa que la radiación hace que el prooxidante y la fotooxidante produzcan radicales libres, lo que ocasiona una pérdida significativa de algunas propiedades físicas del polietileno de baja densidad (LDPE) y por lo tanto ocasiona la oxidación de la molécula.[31].

Tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos y fotooxidativos son similares, ya que los 2 métodos se clasifican como oxidación degradativa. La principal diferencia entre los dos es la secuencia de los pasos de iniciación que conducen al ciclo de auto-oxidación [45]. La fotooxidación y la térmica liberan muchos productos como alcanos, alquenos, cetonas, alcoholes, aldehídos, y aumentan la hidrofilia y el área superficiales, para la colonización microbiana [51]. Como resultado de la exposición térmica, la columna vertebral de cadena larga de LDPE comienza a separarse

(escisión molecular) e interactuar entre sí para cambiar las propiedades del polímero [38]. Las características del polímero, el tipo de organismo y la naturaleza del pretratamiento son los factores que afectan el proceso de biodegradación. Para aumentar la sensibilidad a la biodegradación y mejorar la hidrofilia y la formación de biopelículas [52].

Mecanismo de degradación térmica

La degradación térmica de los polímeros consiste en dos reacciones distintas, que ocurren simultáneamente en un reactor u horno [55]. Uno es una escisión aleatoria de enlaces, lo que provoca una reducción del peso molecular del polímero en bruto, y el otro es una escisión en el extremo de la cadena de C-C, generando productos volátiles [27,55]. La degradación térmica de los polímeros sigue a la degradación del extremo de la cadena (también conocida como ruta de descompresión) o ruta de degradación aleatoria. La degradación aleatoria ocurre en cualquier punto aleatorio a lo largo de la cadena del polímero. Esto es inverso al proceso de policondensación (polimerización de monómeros), donde el polímero se degrada a fragmentos de menor peso molecular pero prácticamente no se libera monómero. Para que ocurra una degradación aleatoria, la cadena polimérica no requiere necesariamente llevar ningún sitio activo debido a esto el tratamiento térmico es un factor que aporta el inicio de la biodegradación del LDPE [49].

En los estudios de Sowmya (2014) se pudo evidenciar la biodegradación por hongos en láminas de LDPE sometidas a pretratamientos térmicos en autoclave, obteniendo los siguientes porcentajes en la pérdida de peso del LDPE 7.5, 23 y 16 % mediado por los hongos *Chaetomium globosum*, *T. Harzianum*, *Penicillium simplicissimum*. [31,32,34]. Un estudio realizado por El-Sayed (2021), las laminas de LDPE fueron sometidas a 80°C dando como resultado una eficiencia de 39.1% en la biodegradación, que fue mediada por un cultivo mixto de los hongos *Aspergillus carbonarius* y *A. Fumigatus*.

Tabla 1. Pretratamiento de residuos LPDE provenientes de vertederos de basura.

Autor(es)	Especie/ Género(s)	Pretratamiento	Resultado	Referencias
El-Sayed MT., Rabie GH., Hamed EA	<i>Aspergillus carbonarius</i> y <i>A. fumigatus</i>	Térmico, químico (HNO ₃) y radiación gamma	Los tratamientos hicieron que el LDPE fuera más susceptible al cultivo mixto. Aumentó la sensibilidad, mejoró la hidrofilia y la formación de biopelículas.	[43]

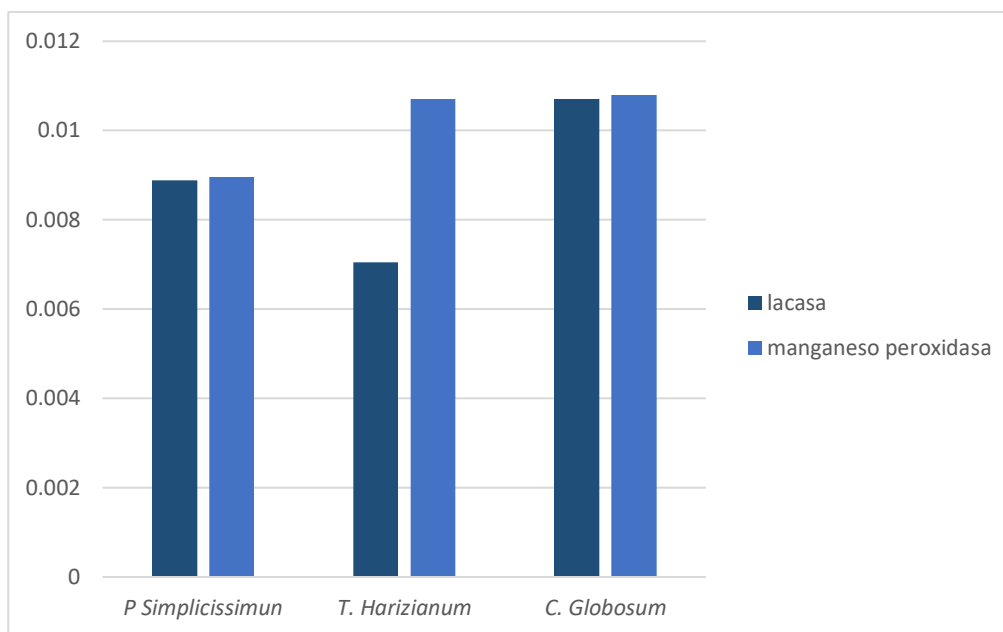
Autor(es)	Especie/ Género(s)	Pre-Tratamiento	Resultado	Referencias
Sowmya HV., Thippeswamy B	<i>Chaetomium globosum</i> ,	Autoclave, luz UV, esterilización superficial	El polietileno tratado con UV como única fuente de carbono fue mucho mejor que el esterilizado en autoclave y en la superficie.	[31]
Sowmya HV., Krishnappa M., Thippeswamy B	<i>Trichoderma harzianum</i>	Uv, autoclave y esterilizado superficial	Los tratamientos hacen que el material pierda algunas de sus propiedades físicas, lo que hace que se oxide y sea más sensible a la biodegradación.	[32]

Actividad enzimática de los hongos degradadores del polietileno de baja densidad (LDPE)

Una vez que la red de hifas se adhiere a la superficie del polietileno de baja densidad (LDPE), el hongo comienza a crecer utilizando el polímero como fuente de carbono y energía [6]. El proceso de biodegradación incluye la introducción de grupos funcionales (hidroxilo -OH y carbonilo C=O) en la molécula de polímero y la división de las cadenas carbonadas por enzimas extracelulares como la lacasa y magnesio-peroxidasa [34]. Donde la primera reduce el peso molecular promedio y la última además de reducir el peso molecular promedio, reduce el número molecular promedio del polímero [22,34]. De tal forma que la reducción de la molécula, permite proporcionar el polímero en pequeños fragmentos que ingresan al metabolismo intracelular como fuentes de carbono y energía para el crecimiento de los hongos [30].

Tres estudios realizados por Sowmya y colaboradores 2014, 2015^a y 2015^b, mostraron la degradación de LDPE utilizando los hongos *Chaetomium globosum*, *T. harzianum*, *Penicillium simplicissimum*. Dando como resultados positivos tanto para la lacasa como para la enzima manganeso peroxidasa, en la décima semana de incubación obtuvieron los siguientes resultados: Para peroxidasa de manganeso (0,01080 UI/mL, 0,00710 UI/mL 0,00896 UI/mL) y lacasa 0,01071 UI/mL, 0,00705 UI/mL 0,00888 UI/mL. Los tres estudios demostraron que la actividad de peroxidasa de manganeso fue mayor en comparación con la actividad de lacasa (fig 8) se observa mayor actividad enzimática en el hongo *C. Globosum* en [31,32,34]. Zahra (2010) reportó que la actividad de MnP y Lac en el sobrenadante libre de células aumentó en la semana 16 con el LDPE tratado térmicamente 0,817 y 0,417 UI/mL[25]. Figura 8

Figura 8. Actividad de las enzimas lacasa (Lc) y peroxidasa de manganeso (MnP) en la décima semana de incubación



En dos de los estudios de Sowmya y colaboradores (2015, 2014) la actividad enzimática se calculó utilizando un método espectrofotométrico y se llevó a cabo la extracción bruta de las enzimas. El peso molecular de la lacasa (Lc) y de la peroxidasa de manganeso fueron 66 y 88 kDa y 60 y 55 KDa respectivamente [31,30]. De acuerdo con otros investigadores el peso molecular de la lacasa es de alrededor de 60 a 90 kDa [34]. Datos que están de acuerdo con lo encontrado al hacer esta revisión. También se determinó la capacidad de las enzimas crudas para degradar el polietileno, los resultados de la pérdida de peso de polietileno fueron de 0.3-0.5 % para lacasa y 0.4,06% para peroxidasa manganeso [31,30]. De igual forma se ha informado que gracias a la capacidad de estas enzimas los hongos logran también hacer la biodegradación de otros polímeros como PE y PU [49].

Medición de la biodegradación del polietileno de baja densidad (LDPE)

Las técnicas usadas en los experimentos de la biodegradación están dirigidas principalmente a investigar unas o más etapas de los cambios en la biodegradación del polímero. Generalmente se usan varias técnicas experimentales para medir la biodegradación. Un método que evidencia la transformación del deterioro físico (erosión) superficial del material (LDPE), donde ha sido colonizado por microorganismos, mostrando un patrón de crecimiento, es la técnica de espectroscopia electrónica de barrido (SEM) [54]. Otro método utilizado para comprender la transformación sobre las etapas de biodeterioro y transformación, es la espectrofotometría por transformada de Fourier (FTIR), que ha sido el más implementado para analizar la degradación del polietileno por fotooxidación. Se ha podido interpretar productos oxidados de la degradación, como la aparición de grupos carbonilos después de la irradiación UV, agentes oxidantes, enzimas oxidantes de

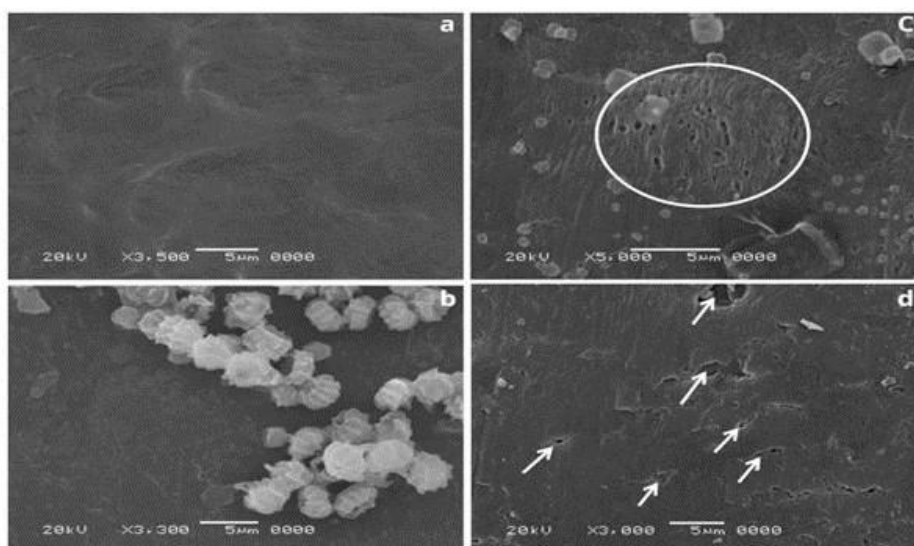
microorganismos para determinar la formación de nuevos grupos debido a la biodegradación [18,54]. Ver Tabla S4 (complementaria).

Microscopia electronica de barrido (SEM)

En los estudios anteriores se pudieron observar erosiones superficiales del polimero (LDPE) tras la colonización de los hongos. El espectro proporciona una visión detallada de los cambios superficiales del LDPE, donde el polímero se empieza a picarse y erosionar mostrando la aparición de grietas, descamación y formación de cavidades en la superficie del polímero [43,44,48]. La presencia de cavidades puede deberse a la ausencia de una distribución uniforme de ramas cortas o productos fotodegradables en la matriz del polímero lo que sugiere que los hongos penetraron en la matriz de LDPE durante la degradación [29].

En el estudio Manal (2021) muestran las imágenes de la microscopia electronica de barrido (SEM) del polietileno después de 16 semanas de incubación en cultivo mixto de *Aspergillus carbonarius* y *A. fumigatus*. En la Figura 9 en el cuadro (a) aún no se evidencia la degradación, el principio de la degradación se empieza a ver en el cuadro (b) tras la adhesión y penetración de las esporas e hifas fragmentadas en la superficie del material. Sin embargo, el daño se empieza a notar en el cuadro (d) y (c), se empieza a ver la superficie con aspecto de arrugas como lo muestra el círculo del cuadro (c). La aparición de grietas, surcos y hoyos lo indican las flechas en el cuadro (d), por lo que se demuestra la acción efectiva de la deformación del LDPE por los hongos [43].

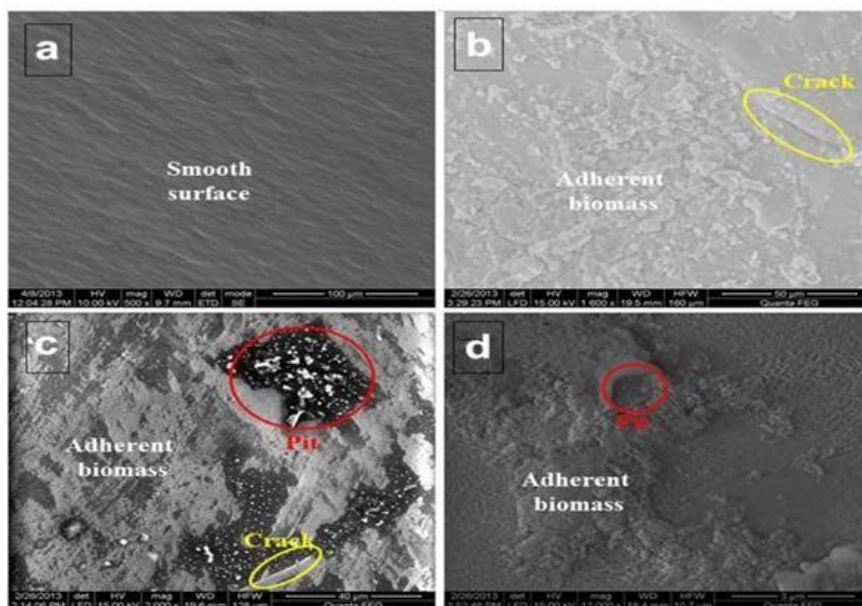
Figura 9. Los resultados de la figura muestran los resultados de la micrografía SEM de LDPE antes y después del tratamiento con el cultivo mixto de *Aspergillus carbonarius* y *A. fumigatus*.



Fuente: Adaptado de *Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) using mixed culture of Aspergillus carbonarius and A. fumigates. Environment, Development and Sustainability de El-Sayed, MT, Rabie, GH and Hamed, EA (2021).*, 23 (10), 1455614584.

En el estudio de Merina (2018) informan sobre la capacidad que tienen varias enzimas (Lc y MnP) secretadas por *Aspergillus versicolor*, *A.flavus* y *F. solani* que son capaces de oxidar la cadena hidrocarbonada del esqueleto polimérico, ya que debido a su tamaño no pueden penetrar la estructura del LDPE, lo que hace que ellas actúan por oxidación y erosión de la superficie [53]. La degradación se observó en la Figura 10, donde nos muestra que el control (sin hongo) aparece con una superficie lisa, sin defectos (cuadro a). En los cuadros (b) y (d) se empieza a notar la aparición corrosión superficial y la deformación de la superficie (indicadas por un círculo rojo) y grietas (indicadas por un círculo amarillo) tras la colonización de los hongos después de 60 días de incubación. Dicha adhesión y deformación se observa más detalladamente en el cuadro c, donde se evidencia el aumento de la fosa, además de la formación de biopelículas tras la acción de los hongos *A. versicolor*, seguido de *A. flavus* y *F. Solani* [53].

Figura 10. Muestra la micrografía SEM del LDPE después de la incubación, muestra la superficie lisa de control (sin tratamiento fúngico) y la erosión del polímero después de ser tratado con *Aspergillus versicolor*, *A.flavus* y *F. Solani*.



Fuente: Adaptado de “*Biodegradation and fungal-mediated deterioration study of low density polyethylene (LDPE) isolated from a municipal landfill in Chennai, India. Energy, ecology and Enviroment*” de Das, MP, Kumar, S and Das, J. (2018)., 3 (4)229-236.

Como demuestran los estudios anteriores de SEM sobre la biodegradación de LDPE, muchos investigadores han informado los mismos cambios morfológicos en la degradación del polímero por varias cepas de *Aspergillus*, donde afirman que estos hongos tienen alta capacidad de adherirse y formar biopelículas para biodegradar el polímero, además de aquellos que fueron previamente tratados (UV, temperatura y químico) la estructura era físicamente más débil [32,46,50].

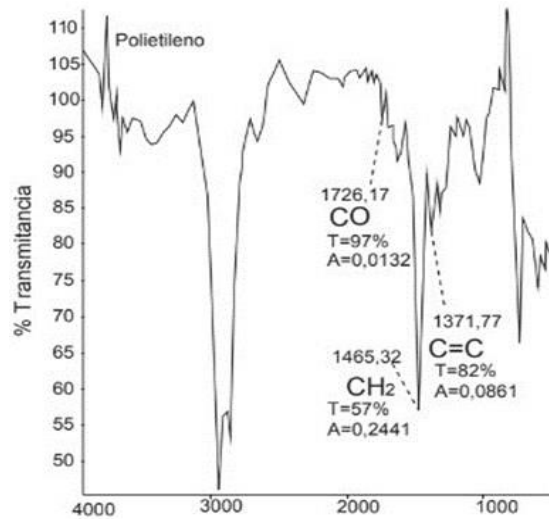
Espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR)

Durante la biodegradación del polietileno, la formación de grupos carbonilos se da mediante procesos abióticos como rayos UV, Temperatura, humedad etc. Que implican en la oxidación de la cadena polimérica, formando grupos carboxílicos los cuales experimentan la oxidación que es catalizado por microorganismos [18]. La espectroscopia infrarroja (FTIR), es una herramienta importante para el análisis de cambios estructurales debido a la degradación para esto inducida en el polietileno, ya que nos permite monitorear la formación y desaparición de bandas de carbonilo y doble enlace. [29,44]. El espectro infrarrojo (IR) se analiza separando 2 zonas referenciales la primera va de 1200 a 3600 que es conocida como grupos funcionales y la segunda va de 600 a 1200 conocida como huella digital, en esta última se puede evaluar si el polímero ha sufrido un efecto, biológico, químico o físico.[41]

El análisis FTIR de las películas de LDPE degradadas ofrece una visión cercana del estiramiento N-H del grupo aldehído a $3334,92$ y $3228,84$ cm^{-1} , C=C simétrica del anillo aromático en $1639,49$ cm^{-1} , C=O estiramiento del grupo aldehído a $1735,93$ cm^{-1} , pico en el codo N=O que corresponde a $1365,60$ cm^{-1} , estiramiento C-O del grupo éter a $1217,08$ y $1078,21$ cm^{-1} [35]. Por lo general cuando hay cambios en estos grupos funcionales es porque se ha detectado una actividad biológica sobre un sustrato, y cuando hay presencia de microorganismos se reporta una disminución en los índices de carbonilo, esto quiere decir que las concentraciones de los grupos funcionales superficiales disminuirán. [16].

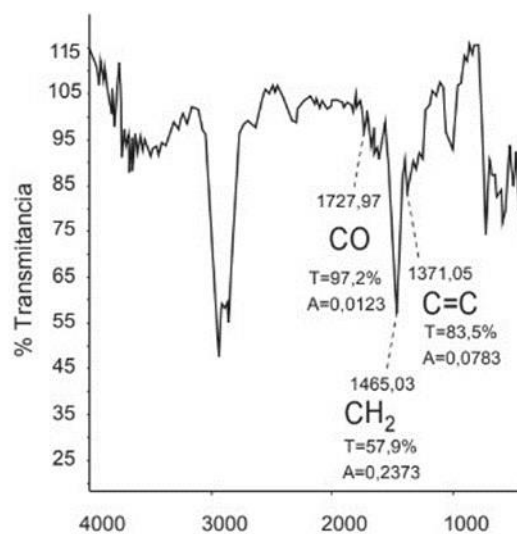
En el estudio de Uribe, Diego (2010) realizó un análisis por espectroscopia infrarroja del LDPE, incubadas por 2 meses con un consorcio de hongos *Penicillium sp*, *Rhodotorula sp* y *Hyalodendron sp*. Mediante el equipo FTIR analizó el LDPE obteniendo los grupos funcionales característicos y los índices de reducción del C-O y C=C los cuales indicaron la actividad biodegradable del hongo sobre el polímero [41]. (Ver Tabla complementaria S4)

Figura 11. Análisis FTIR del LDPE sin inoculación, utilizando como patrón inicial



Fuente: Adaptada de “Biodegradation of low-density polyethylene by the action of a microbial consortium isolated from a landfill, Lima, Peru. *Peruvia Journal of biology*”
 Uribe, Diego, Giraldo, Daniel, Gutierrez, Susana, and Merino, Fernando. (2010), 17(1), 133-136.

Figura 12. Análisis FTIR del LDPE después de 2 meses de incubación con el consorcio de los hongos *Penicillium sp*, *Rhodotorula sp*, *Hyalodendron sp*.



Fuente: Adaptada de “Biodegradation of low-density polyethylene by the action of a microbial consortium isolated from a landfill, Lima, Peru. *Peruvian Journal of Bioglogy*”

Uribe, Diego, Giraldo, Daniel, Gutierrez, susana, and Merino, Fernando.(2010)., 17(1), 133-136.

En las gráficas se pudo analizar que hay una diferencia estadística en los grupos C-O a comparación con el control (control 1726,17; consorcio 1727,97 cm^{-1}) y C=C (control 1371,77 cm^{-1} ; consorcio 1371,05 cm^{-1}) como se observa en la fig 8 y 9. se demostró por medio del FTIR una disminución del 4.08% de la fuente de carbono con respecto al grupo funcional C-O y para C=C un índice de reducción de 19,77% [41].

CONCLUSIONES

Los hongos del género *Aspergillus*, fueron los más efectivos para la degradación del polietileno de baja densidad (LDPE) en vertederos de residuos solidos. Lo que evidencia que los hongos, pueden ser una alternativa viable para la eliminación de plástico en el medio ambiente.

En la mayoría de los casos se implementa el pretratamiento con irradiación ultravioleta (UV), ya que es mucho más eficaz para promover daños en las superficies del polímero. Los rayos UV tienen suficiente energía para ocasionar daños en los grupos carbonilos, por medio de las reacciones de Norrish Tipo I y II, que permite la formación de grupos funcionales (Esteres, alcoholes, cetonas, ácidos carboxílicos) que son utilizados por las enzimas de los hongos para su metabolización, mineralización y crecimiento.

Las dos técnicas que presentaron mayor tendencia para observar los cambios de la estructura y superficie del LDPE, después de ser sometido al proceso de biodegradación, fueron:

Microscopia electronica de barrido (SEM) y espectrofotometría por transformada de Fourier (FTIR). La primera, evidenciando el deterioro superficial del material, la aparacion de grietas y ruptura del polimero, y la segunda que permitio observar la reducción de los grupos funcionales como carbonilos, ester o cetonas, evidenciando la aparicion y desaparicion de de estos grupos, relacionadose con la capacidad de degradacion de cada hongo.

Algunos estudios reportaron que las enzimas lacasa (Lc) y peroxidasa de manganeso (MnP), aisladas de los hongos, presentaron actividad durante la biodegradación del polietileno de baja densidad, estas actúan en la división de las cadenas carbonadas reduciendo el peso molecular, proporcionando el polímero en pequeños fragmentos, que ingresan al metabolismo intracelular como fuentes de carbono y energía para el crecimiento de los hongos. Demostrando que la enzima peroxidasa de manganeso, tuvo mayor actividad en biodegradativa del polimero respecto a la enzima lacasa.

Perspectivas a futuro

El polietileno de baja densidad (LDPE), no es un polímero tan tóxico comparado a otros como el HDPE, PP o PVC, por lo que sería de gran importancia estudiar más a fondo los genes de las enzimas implicados en la biodegradación, ya que la participación de estas enzimas hicieron mas efectiva la degradación. Por lo qué, sería bueno utilizar la metagenómica y la ingeniería genética para identificar los genes y modificarlos, además trabajar en conjunto con bacterias que rapida replicacion para la eliminacion del plastico en el medio ambiente.

Agradecimientos

Damos las gracias principalmente a Dios por sus bendiciones y por permitirnos cumplir este sueño, a nuestros padres por ser nuestros pilares quienes nos impulsan a salir adelante, por ser la fuente de amor y apoyo incondicional en este proceso. A nuestros hermanos por ayudarnos a cumplir nuestros sueños, y creer en nosotras. A mí hija Mariana por ser el impulso de cumplir mis metas y sueños. A nuestras parejas por su comprensión y apoyo. A la profesora Luz Dary por darnos la oportunidad de aprender con ella, por ser nuestra guía de estudio, por compartir con nosotras su conocimiento, por confiar en nosotras y por la paciencia.

REFERENCIAS

- [1] Méndez, C. R., Vergaray, G., Béjar, V. R., & Cárdenas, K. J. (2007). Aislamiento y caracterización de micromicetos biodegradadores de polietileno. *Revista peruana de biología*, 13(3), 203-206.
- [2] Abraham, J., Ghosh, E., Mukherjee, P., & Gajendiran, A. (2017). Microbial degradation of low density polyethylene. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(1), 147154. <https://doi.org/10.1002/ep.12467>
- [3] Dey, U., Mondal, N. K., Das, K., & Dutta, S. (2012). An approach to polymer degradation through microbes. *IOSR J Pharm*, 2(3), 385-8.
- [4] Malafatti-Picca, L., de Barros Chaves, M. R., de Castro, A. M., Valoni, É., de Oliveira, V. M., Marsaioli, A. J., ... & Attili-Angelis, D. (2019). Hydrocarbon-associated substrates reveal promising fungi for poly (ethylene terephthalate)(PET) depolymerization. *Brazilian Journal of Microbiology*, 50(3), 633-648.

- [5] Soto, J. M., Blázquez, G., Calero, M., Quesada, L., Godoy, V., & Martín-Lara, M. Á. (2018). A real case study of mechanical recycling as an alternative for managing of polyethylene plastic film presented in mixed municipal solid waste. *Journal of cleaner production*, 203, 777-787. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.302>
- [6] Zaidi, Z., Mawad, D., & Crosky, A. (2019). Soil biodegradation of unidirectional polyhydroxybutyrate-co-valerate (PHBV) biocomposites toughened-adipate-co-terephthalate (PBAT) and epoxidized natural rubber (ENR). *Frontiers in Materials*, 6, 275 <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.0027>
- [7] Coreño-Alonso, J., & Méndez-Bautista, M. T. (2010). Relationship between structure and properties of polymers. *Educación química*, 21(4), 291-299. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187893X2010000400006&script=sci_abstract&tlng=en
- [8] Seenivasagan, R., Karthika, A., & Poonkuzhali, K. (2022). In Vitro and In Silico Study of the Efficacy of Fungi in Low-Density Polyethylene Degradation in a Disposal Paper Cup. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(3), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05534-8>
- [9] Dilara, P. A., & Briassoulis, D. (2000). Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as greenhouse covering materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(4), 309-321. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0513>
- [10] Zeghal, E., Vaksman, A., Vielfaure, H., Boekhout, T., & Niemann, H. (2021). The Potential Role of Marine Fungi in Plastic Degradation A Review. *Frontiers in Marine Science*, 8, 738877. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.738877>
- [11] Munir, E., Sipayung, F. C., Priyani, N., & Suryanto, D. (2018, March). Potential of bacteria isolated from landfill soil in degrading low density polyethylene plastic. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 126, No. 1, p. 012144). IOP Publishing. 10.1088/1755-1315/126/1/012144
- [12] Avolio, R., Spina, F., Gentile, G., Cocca, M., Avella, M., Carfagna, C., ... & Errico, M. E. (2019). Recycling polyethylene-rich plastic waste from landfill reclamation: Toward an enhanced landfill-mining approach. *Polymers*, 11(2) 208.
- [13] Otake, Y., Kobayashi, T., Asabe, H., Murakami, N., & Ono, K. (1995). Biodegradation of polyethylene, polystyrene, polyvinyl chloride, and urea formaldehyde resin buried under soil for over 32 years. *Journal of Applied Polymer Science*, 56(13), 1789-1796. <https://doi.org/10.1002/app.1995.070561309>
- [14] Awasthi, S., Srivastava, P., Singh, P., Tiwary, D., & Mishra, P. K. (2017). Biodegradation of thermally treated high-density polyethylene (HDPE) by *Klebsiella pneumoniae* CH001. *3 Biotech*, 7(5), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0959-3>
- [15] Bellas, J., Martínez-Armentál, J., Martínez-Cámara, A., Besada, V., & Martínez-Gómez, C. (2016). Ingestion of microplastics by demersal fish from the Spanish Atlantic and

Mediterranean coasts. *Marine pollution bulletin*, 109(1), 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.026>

- [16] Restrepo - Flórez, J. M., Bassi, A., & Thompson, M. R. (2014). Microbial degradation and deterioration of polyethylene A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 88, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.12.014>
- [17] Sáenz, M., Borodulina, T., Diaz, L., & Banchon, C. (2019). Minimal conditions to degrade low density polyethylene by *Aspergillus terreus* and *Niger*. *Journal of Ecological Engineering*, 20(6). <https://doi.org/10.12911/22998993/108699>
- [18] Rodrigo, O. A., Daynet, S. D. C., Jaime, N. M., Nora, F., Jos, L. B., Alejandro, A., ... & Milton, B. A. (2021). Analysis of the degradation of polyethylene, polystyrene and polyurethane mediated by three filamentous fungi isolated from the Antarctica. *African Journal of Biotechnology*, 20(2), 66-76. <https://doi.org/10.5897/AJB2020.17200>
- [19] Cosgrove, L., McGeechan, P. L., Robson, G. D., & Handley, P. S. (2007). Fungal communities associated with degradation of polyester polyurethane in soil. *Applied and environmental microbiology*, 73(18), 5817-5824. <https://doi.org/10.1128/AEM.01083-07>
- [20] Ndahebwa Muhonja, C., Magoma, G., Imbuga, M., & Makonde, H. M. (2018). Molecular characterization of low-density polyethene (LDPE) degrading bacteria and fungi from Dandora dumpsite, Nairobi, Kenya. *International journal of microbiology*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4167845>
- [21] Ibrahim, I. N., Maraqa, A., Hameed, K. M., Saadoun, I. M., & Maswadeh, H. M. (2011). Assessment of potential plastic-degrading fungi in Jordanian habitats. *Turkish Journal of Biology*, 35(5), 551-557.
- [22] Passos, T. M., Marconato, J. C., & Franchetti, S. M. M. (2015). Biodegradation of films of low density polyethylene (LDPE), poly (hydroxybutyrate-co-valerate)(PHBV), and LDPE/PHBV (70/30) blend with *Paecilomyces variotii*. *Polímeros*, 25, 29-34. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1432>
- [23] Kim, M. N., Lee, A. R., Yoon, J. S., & Chin, I. J. (2000). Biodegradation of poly (3hydroxybutyrate), Sky-Green® and Mater-Bi® by fungi isolated from soils. *European Polymer Journal*, 36(8), 1677-1685.
- [24] Kumar, S., Das, MP, Rebecca, LJ and Sharmila, S. (2013). Isolation and identification of LDPE degrading fungi from municipal solid waste. *Journal of chemical and pharmaceutical research* , 5 (3), 78-81.
- [25] Kale, S. K., Deshmukh, A. G., Dudhare, M. S., & Patil, V. B. (2015). Microbial degradation of plastic: a review. *Journal of Biochemical Technology*, 6(2), 952-961 <https://doi.org/10.5772/intechopen.865124>

- [26] Lucas N, Bienaime C, Belloy C, Queneudec M, Silvestre F, Nava-Saucedo JE (2008). Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques. *Chemosphere* 73, 429442.
- [27] Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology advances*, 26(3), 246-265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>
- [28] Esmaeili, A., Pourbabae, A. A., Alikhani, H. A., Shabani, F., & Esmaeili, E. (2013). Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by mixed culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in soil. *Plos one*, 8(9), e71720. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071720>
- [29] Esmaeili, A., Pourbabae, A. A., Alikhani, H. A., Shabani, F., & Esmaeili, E. (2013). Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by mixed culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in soil. *Plos one*, 8(9), e71720.
- [30] Malachová, K., Novotný, Č., Adamus, G., Lotti, N., Rybková, Z., Soccio, M., ... & Fava, F. (2020). Ability of *Trichoderma hamatum* isolated from plastics-polluted environments to attack petroleum-based, synthetic polymer films. *Processes*, 8(4), 467.
- [31] Sowmya, H. V., & Thippeswamy, B. (2014). Low density polyethylene degrading fungi isolated from local dumpsite of Shivamogga district. *International Journal of Biological Research*, 2(2), 39-43.
- [31] Sowmya, H. V., & Thippeswamy, B. (2014). Low density polyethylene degrading fungi isolated from local dumpsite of Shivamogga district. *International Journal of Biological Research*, 2(2), 39-43. <https://doi.org/10.14419/ijbr.v2i2.2877>
- [32] Sowmya, H. V., Krishnappa, M., & Thippeswamy, B. (2014). Degradation of polyethylene by *Trichoderma harzianum* SEM, FTIR, and NMR analyses.
- [33] *Environmental monitoring and assessment*, 186(10), 6577-6586. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3875-6>
- [34] Gajendiran, A., Subramani, S., & Abraham, J. (2017, November). Effect of *Aspergillus Versicolor* strain JASS1 on low density polyethylene degradation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 263, No. 2, p. 022038). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/2/022038>
- [35] Sowmya, H. V., Krishnappa, M., & Thippeswamy, B. (2015). Degradation of polyethylene by *Penicillium simplicissimum* isolated from local dumpsite of Shivamogga district. *Environment, development and sustainability*, 17(4), 731-745. <https://doi.org/10.1007/s10668-014-9571-4>
- [36] Gajendiran, A., Krishnamoorthy, S., & Abraham, J. (2016). Microbial degradation of low-density polyethylene (LDPE) by *Aspergillus clavatus* strain JASK1 isolated from landfill soil. *3 Biotech*, 6(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0394-x>

- [37] Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G., & Imbuga, M. (2018). Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PloSone*, 13(7), e0198446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>
- [38] Deepika, S., & Jaya, M. R. (2015). Biodegradation of low density polyethylene by microorganisms from garbage soil. *J Exp Biol Agric Sci*, 3, 1-5.
- [39] Kunlere, I. O., Fagade, O. E., & Nwadike, B. I. (2019). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by certain indigenous bacteria and fungi. *International Journal of Environmental Studies*, 76(3), 428-440. <https://doi.org/10.1080/00207233.2019.1579586>
- [40] Verma, N., & Gupta, S. (2019). Assessment of LDPE degrading potential *Aspergillus* species isolated from municipal landfill sites of Agra. *SN Applied Sciences*, 1(7). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0746-3>
- [41] Arutchelvi, J., Sudhakar, M., Arkatkar, A., Doble, M., Bhaduri, S., & Uppara, P. V. (2008). Biodegradation of polyethylene and polypropylene.
- [42] Uribe, D., Giraldo, D., Gutiérrez, S., & Merino, F. (2010). 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), 133-136.
- [43] Maroof, L., Iqbal, M., Farman, S., & Faisal, S. (2022). Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) Bags by Fungi Isolated from Waste Disposal Soil. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8286344>
- [44] El-Sayed, M. T., Rabie, G. H., & Hamed, E. A. (2021). Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) using the mixed culture of *Aspergillus carbonarius* and *A. fumigates*. *Environment, Development and Sustainability*, 23(10), 14556-14584. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01258-7>
- [45] Albertsson, AC, Andersson, SO y Karlsson, S. (1987). los mecanismo de biodegradación del polietileno. *Degradación y estabilidad de polímeros*, 18,73 87. [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(87\)90084-X](https://doi.org/10.1016/0141-3910(87)90084-X)
- [46] Singh, B., & Sharma, N. (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer degradation and stability*, 93(3), 561-584. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2007.11.008>
- [47] Pramila, R., & Ramesh, K. V. (2011). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by fungi isolated from marine water: a SEM analysis. *Afr J Microbiol Res*, 5(28), 5013-5018. <https://doi.org/10.5897/AJMR11.670>

- [48] Spina, F., Tummino, M. L., Poli, A., Prigione, V., Ilieva, V., Cocconcelli, P., ... & Varese, G. C. (2021). Low density polyethylene degradation by filamentous fungi. *Environmental Pollution*, 274, 116548. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116548>
- [49] Miranda, G., Pires, J., Souza, G., Fraga, F., Azevedo, C., Lourega, R., ... & Ligabue, R. (2020). Abiotic and biotic degradations of an LDPE blend in landfill soil in southern Brazil. *Iranian polymer journal* , 29 (12), 1123-1135. <https://doi.org/10.1007/s13726-020-00866-w>
- [50] Ali, S. S., Al-Tohamy, R., Koutra, E., Kornaros, M., Khalil, M., Elsamahy, T., ... & Sun, J. (2021). Coupling azo dye degradation and biodiesel production by manganese-dependent peroxidase producing oleaginous yeasts isolated from wood-feeding termite gut symbionts. *Biotechnology for biofuels*, 14(1), 1-25. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01906-0>
- [51] Zahra, S., Abbas, S. S., Mahsa, M. T., & Mohsen, N. (2010). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by isolated fungi in solid waste medium. *Waste management*, 30(3), 396-401. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.027>
- [52] Nagarkar, S. S., Joarder, B., Chaudhari, A. K., Mukherjee, S., & Ghosh, S. K. (2013). Highly selective detection of nitro explosives by a luminescent metal organic framework. *Angewandte Chemie*, 125(10), 2953-2957. <https://doi.org/10.1002/ange.201208885>
- [53] Koshti, R., Mehta, L., & Samarth, N. (2018). Biological recycling of polyethylene terephthalate: a mini-review. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(8), 3520-3529. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1214-7>
- [54] Das, MP, Kumar, S. and Das, J. (2018). Biodegradation and fungal-mediated deterioration study of low density polyethylene (LDPE) isolated from a municipal landfill in Chennai, India. *Energy, Ecology and Environment* , 3 (4), 229-236. <https://doi.org/10.1007/s40974-018-0085-z>
- [55] Hadad, D., Geresh, S. y Sivan, A. (2005). Biodegradación del polietileno por la bacteria termófila *Brevibacillus borstelensis*. *Revista de microbiología aplicada* , 98 (5), 1093-1100.

Tabla complementaria 2. Información recopilada para la extracción de datos

Autor(es)	País/ciudad	año	Especie/ Género(s)	Tiempo	Medición	Eficiencia (%) en pérdida de peso	Observación	Ref
Verma, N., Gupta S	India, Agra	2019	<i>Aspergillus flavus</i> y <i>A. terreus</i>	4 y 9 meses	% Pérdida de peso, Microscopía electrónica de barrido (SEM), Espectroscopia de transformación de fourier (FTIR)	Suelo: 30,6 % <i>A. flavus</i> y 11,4% <i>A. terreus</i> ; Sintético: 14, 3 <i>A. flavus</i> 13,1 % <i>A. terreus</i>	Es probable que estos aislados produzcan enzimas capaces de degradar el LDPE.	[44]
El-Sayed MT., Rabie GH., Hamed EA	Egipto, Sharqiyah	2021	<i>Aspergillus carbonarius</i> y <i>A. fumigatus</i>	16 semanas	% de pérdida de peso, SEM, FTIR, X(XRD) y cromatografía de gases espectrometría de masas (GS-MS)	Simple: (3.8%) <i>A. carbonarius</i> y (2.277%) <i>A. fumigatus</i> ; Mixto: (8.81%) <i>A. carbonarius</i> y (7.27%) <i>A. fumigatus</i> en % peso seco. 39.1% (TT), 17.76%(CT) y 5.79% (yT)	Los hongos filamentosos pueden producir hidrofobinas (proteínas de bajo peso molecular) que pueden dar hidrofobicidad a las estructuras fúngicas.	[43]
Gajendiran A., Krishnamoorthy S., Abraham J	India	2016	<i>Aspergillus clavatus</i>	90 días	% de pérdida de peso, producción de CO ₂ (Test de Sturm), FTIR, micrografías (AFM) y SEM	35% <i>Aspergillus clavatus</i>	No reporta	[35]
Gajendiran A., Subramani S., Abraham J	China, verolle	2017	<i>Aspergillus versicolor</i>	90 días	% de pérdida de peso, producción de CO ₂ , examen SEM y AFM, FTIR	40,6 % <i>Aspergillus versicolor</i>	La pérdida de peso del polietileno durante la biodegradación puede deberse a la desaparición de impurezas solubles.	[33]

Esmaeili A., Pourbabaee AA., Alikhani HA., Shabani F., Esmaeili E	Teherán, Irán	2013	<i>Aspergillus niger</i>	126 días	Carbono de la biomasa microbiana del suelo (MBC),(FT-IR), X(XRD), producción de CO2 y (SEM)	29, 5% y 15,8 % <i>A. niger</i> con luz UV y sin luz UV	No reporta	[29]
---	------------------	------	--------------------------	----------	---	---	------------	------

Autor(es)	País/ciudad	año	Especie/ Género(s)	Tiempo	Medición	Eficiencia (%) en pérdida de peso	Observación	Ref
Muhonja C. N., Makonde H., Magoma G., Imbuga M	Kenia, Nairobi	2018	<i>Aspergillus Oryzae</i>	16 semanas	% pérdida de peso, (FITIR) y GC-MS	36.4 +/- 5.53% <i>Aspergillus oryzae</i>	Aparición de un nuevo grupo funcional debido a la degradación de hidrocarburos después de la incubación.	[36]
Das MP., Kumar S., Das, J	India, Chennai	2018	<i>Aspergillus versicolor</i> , <i>A.flavus</i> y <i>F. solany</i>	60 días	% de pérdida de peso, análisis (FESEM) y FTIR	19 % <i>Aspergillus vesicular</i> , 17% <i>A.flavus</i> y 13% <i>Fusarium solani</i>	Se pueden considerar a estos hongos candidatos para la formar un biocompost comercial.	[53]
Sowmya HV., Thippeswamy B	India, Shimoga	2014	<i>Chaetomium globosum</i>	3 meses	% de pérdida de peso, microscopía electrónica de barrido y FTIR	Autoclave:7.5%; Luz UV: 21%; Esterilizado superficial:5.6%	No reporta	[31]
Deepika S., Jaya MR	India, Andhra pradesh y Telangana	2015	<i>Aspergillus. niger</i> , <i>A. flavus</i>	6 meses	% del peso del LDPE	26,7 % <i>A. niger</i> y <i>A. flavus</i> (16,45%)	No reporta	[37]
Sowmya HV., Krishnappa M., Thippeswamy B	India, Shimoga	2014	<i>Trichoderma harzianum</i>	3 meses	% de pérdida de peso, SEM, FTIR y RMN	Esterilizado superficial: 13% con <i>Trichoderma harzianum</i>	No reporta	[32]

Maroof L., Iqbal, M., Farman S., Faisal S	Pakistan, Peshawar	2022	<i>A. niger</i> y <i>A. flavus</i>	30 días	% de pérdida de peso y FTIR	22.9 - 16.1% <i>A. niger</i> ; 18.4 - 22.7% <i>A. flavus</i>	Cuando los plásticos se utilizan como sustrato para los hongos, la evaluación de su degradación no se basa en su estructura, si no, en sus propiedades físicas como; punto de fusión, temperatura, tratamiento UV y cristalinidad.	[42]
Kumar S., Das MP., Rebecca LJ., Sharmila S	India, Bangalore	2013	<i>Aspergillus sp</i> y <i>Fusarium sp</i>	30 días	Características microscópicas por examen al microscopio de luz	No reporta	No reporta	[24]
Miranda G., Pires J., Souza G., Fraga F.,	Brazil, Porto Alegre	2020	<i>Aspergillus niger</i>	60 días	Calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis	Mineralización: <i>Aspergillus niger</i> : 15.8 %	No reporta	[48]

Autor(es)	País/ciudad	año	Especie/ Género(s)	Tiempo	Medición	Eficiencia (%) en pérdida de peso	Observación	Ref
Azevedo C., Lourega R., Ligabue R					termogravimétricos (TGA), FTIR y FEGSEM	(sin edad) y 29.5% (envejecida) suelo: 7.6%(sin edad) y 8.6% (envejecida)		
Diego U., Daniel G., Susana G., Fernando M	Lima, Perú	2010	<i>Penicillium sp</i> , <i>Rhodotorula sp</i> , <i>Hyalodendron sp</i> , levadura no identificada	2 meses	% de pérdida de peso y FTIR	C=C un índice de reducción de 6.47% Y C-O IR de 4.08% para hongos y levaduras pérdida de peso 4.8%	Especies de <i>Penicillium</i> muestran su actividad degradativa sobre el polietileno en asociación con <i>Bacillus</i> , también han sido reportado biodeterioro ejercido por algas y otras especies de microorganismos	[41]

Zahra S., Abbas S. S., Mahsa M. T., Mohsen, N	Irán, Teheran	2010	<i>Aspergillus terreus</i> , <i>A. fumigatus</i>	100 días	% de pérdida de peso y SEM	22.5 % <i>A. Terreus</i> ;18.7 <i>A. Fumigatus</i> ;22.6% <i>F.Solani</i>	En este estudio se añadió aserrín cuando la humedad estaba en 70%. Este fue el primer informe de investigación de la degradación del LDPE por <i>A. fumigatus</i>	[50]
Pramila R., & Ramesh K. V.	India, Chennai	2011	<i>Mucor circinelloides</i> , <i>Aspergillus Flavus</i>	7-28 días	SEM, CO2, gravimétrica y volumétricamente por pruebas de Sturm	evolucion CO2: <i>Mucor circinelloides</i> fue de 5.9g/L y <i>Aspergillus flavus</i> evolucionó alrededor de 4,4 g/L de CO2	No reporta	[46]
Spina F., Tummino M. L., Poli A., Prigione V., Ilieva V., Cocconcelli P., Varese G. C	Italia	2021	<i>Fusarium Oxysporum</i> , <i>Fusarium Falciforme</i> y <i>Purpureocillum Lilacinum</i>	6 meses	Ensayos de respirometría (CO2), FTIR, SEM	No reporta	No reporta	[47]
Kunlere I. O., Fagade O. E., Nwadike B. I	Nigeria	2019	<i>Flavus PCM5</i> y <i>A Flavus PCM10</i>	6 semanas	Métodos gravimétricos y FTIR	<i>A. Flavus</i> 1.67%	No reporta	[38]
Autor(es)	País/ciudad	año	Especie/ Género(s)	Tiempo	Medición	Eficiencia (%) en pérdida de peso	Observación	Ref
Malachová K., Novotný Č., Adamus G., Lotti N., Rybková Z., Soccio M., Fava F	Alemania	2020	<i>Trichoderma hamatum</i>	2 meses	FTIR Y GPC	<i>Trichoderma hamatum</i> las pérdidas de peso obtenidas fue de 0.5% a 1.3%	No reporta	[30]

Sowmya H. V., Krishnappa M., Thippeswamy B.	India, Shiva Mogga	2015	<i>P. simplicissimum</i>	No reporta	Microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR) y espectroscopia de resonancia magnética nuclear	P. simplicissimum autoclave 16 % UV 38 % pérdida de peso esterilizado 7.7 %	Los grupos carbonilo son producidos por la luz ultravioleta o por agentes oxidantes y estos grupos son los principales factores en el inicio de la degradación, siendo atacados por microorganismos que degradan los segmentos más cortos de las cadenas de polietileno.	[34]
---	--------------------------	------	--------------------------	------------	--	---	--	------