



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
MICROBIOLOGÍA Y PARASITOLOGÍA



Revisión bibliográfica de la eficiencia de microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010 - 2022

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS – MICROBIOLOGÍA - PARASITOLOGÍA

PRESENTADA POR:

Bach. Leydy Mekinley Fernández Tarrillo

Bach. Anghelly Xiomara Guevara Bravo

LAMBAYEQUE, PERÚ

2023

Revisión bibliográfica de la eficiencia de microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010 - 2022

TESIS

PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE LICENCIADA EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS - MICROBIOLOGÍA – PARASITOLOGÍA

APROBADA POR:

Dra. Graciela Olga Albino Cornejo



PRESIDENTE

Dra. Gianina Llontop Barandiarán



SECRETARIO

MSc. Fransk Amarildo Carrasco Solano



VOCAL

Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán



ASESORA

LAMBAYEQUE, PERÚ

2023

Eficiencia de los microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010 – 2022

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	2%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.unc.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	Submitted to University of Northumbria at Newcastle	1%
	Trabajo del estudiante	
4	doku.pub	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.unap.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
6	Zahra Soleimani, Sara Gharavi, Mohammadreza Soudi, Zahra Moosavi-Nejad. "A survey of intact low-density polyethylene film biodegradation by terrestrial Actinobacterial species", International Microbiology, 2020	1%
	Publicación	


Carmen Rosa Carreño Farfán

7	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	1 %
8	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
9	1library.co Fuente de Internet	<1 %
10	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
11	Submitted to College of Natural Resources, RUB Trabajo del estudiante	<1 %
12	iksadyayinevi.com Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	repository.javeriana.edu.co Fuente de Internet	<1 %
15	editorial.inudi.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.usfq.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
17	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1 %

18 repositorio.unprg.edu.pe
Fuente de Internet



Carmen Rosa Carreño Farfán

<1 %

19

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

<1 %

20

rmib.mx

Fuente de Internet

<1 %

21

Submitted to University of Warwick

Trabajo del estudiante

<1 %

22

dspace.unitru.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

23

digibuo.uniovi.es

Fuente de Internet

<1 %

24

repository.unika.ac.id

Fuente de Internet

<1 %

25

www.acofipapers.org

Fuente de Internet

<1 %

26

Sinosh Skariyachan, Anagha Shamsundar Setlur, Sujay Yashwant Naik, Ashwini Amaresh Naik, Makam Usharani, Kiran S Vasist.

"Enhanced biodegradation of low and high-density polyethylene by novel bacterial consortia formulated from plastic-contaminated cow dung under thermophilic conditions", Environmental Science and Pollution Research, 2017

Publicación

<1 %



Carmen Rosa Carreño Farfán

27 ribuni.uni.edu.ni <1 %
Fuente de Internet

28 librosoa.unam.mx <1 %
Fuente de Internet

29 Camilo A. Velandia Rodriguez, Andres F. Mena-Guacas, Sergio Tobón, Eloy López-Meneses. "Digital Teacher Competence Frameworks Evolution and Their Use in Ibero-America up to the Year the COVID-19 Pandemic Began: A Systematic Review", International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022
Publicación

30 assets.researchsquare.com <1 %
Fuente de Internet

31 www.scilit.net <1 %
Fuente de Internet


32 Jyoti Singh Jadaun, Shilpi Bansal, Ankit Sonthalia, Amit K. Rai, Sudhir P. Singh. "Biodegradation of Plastics for Sustainable Environment", Bioresource Technology, 2022
Publicación

33 doczz.es <1 %
Fuente de Internet

34 dokumen.pub <1 %
Fuente de Internet


Carmen Rosa Carreño Farfán

35	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
36	repository.unad.edu.co Fuente de Internet	<1 %
37	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
38	repositorio.ual.es:8080 Fuente de Internet	<1 %
39	rus.ucf.edu.cu Fuente de Internet	<1 %
40	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	<1 %
41	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	<1 %
42	Submitted to University of Gibraltar Trabajo del estudiante	<1 %
43	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
44	Submitted to Aristotle University of Thessaloniki Trabajo del estudiante	<1 %
45	Mathilde Dupeyron, Tobias Baril, Alex Hayward. "Broadscale evolutionary analysis of	<1 %



Carmen Rosa Carreño Farfán

eukaryotic DDE transposons", Cold Spring Harbor Laboratory, 2021

Publicación

46	Submitted to Universidad de Lima Trabajo del estudiante	<1 %
47	dspace.utpl.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
48	moam.info Fuente de Internet	<1 %
49	revistas.sena.edu.co Fuente de Internet	<1 %
50	wedocs.unep.org Fuente de Internet	<1 %
51	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
52	Submitted to IUBH - Internationale Hochschule Bad Honnef-Bonn Trabajo del estudiante	<1 %
53	patents.google.com Fuente de Internet	<1 %
54	repositorio.unifesp.br Fuente de Internet	<1 %
55	shrmbio.com Fuente de Internet	<1 %



Carmen Rosa Carreño Farfán

56

Cisneros Devora Rodolfo. "Medición y modelaje cuántico de los efectos del oxígeno en silicio poroso", TESIUNAM, 2010

Publicación

<1 %

57

Submitted to unbosque

Trabajo del estudiante

<1 %

58

link.springer.com

Fuente de Internet

<1 %

59

Ana Isabel Del Río García. "ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN, OXIDACIÓN Y OXIDO-REDUCCIÓN ELECTROQUÍMICA APLICADO A LA DECOLORACIÓN / DEGRADACIÓN DE AGUAS DE TINTURA TEXTILES QUE CONTIENEN COLORANTES REACTIVOS CON GRUPOS AZO COMO CROMÓFORO", Universitat Politecnica de Valencia, 2011

Publicación

<1 %

60

phaidra.univie.ac.at

Fuente de Internet

<1 %

61

repository.uamerica.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

62

Irene López Hernández. "Catalizadores metálicos estructurados en reacciones de Química Sostenible", Universitat Politecnica de Valencia, 2021

Publicación

<1 %



Carmen Rosa Carreño Farfán

63 Margarita Kalamara, James C. Abbott, Cait MacPhee, Nicola Stanley-Wall. "Biofilm hydrophobicity in environmental isolates of *Bacillus subtilis*", Cold Spring Harbor Laboratory, 2021 $<1\%$

64 MÓNICA PASCUAL PAYÁ. "Investigación sobre la mejora de la humectabilidad de films poliméricos de polietileno de baja densidad (LDPE) mediante plasma por descarga corona. Optimización de laminados con espumas de polietileno mediante procesos de laminación con adhesivos Hot-Melt para aplicaciones técnicas en el sector de automoción", Universitat Politecnica de Valencia, 2011 $<1\%$

65 www.dspace.uce.edu.ec $<1\%$

66 www.mdpi.com $<1\%$

67 www.scribd.com $<1\%$

68 Submitted to Universidad de Alicante $<1\%$

69 Submitted to Universidad de Costa Rica $<1\%$


Carmen Rosa Carreño Farfán

70 Submitted to University of Leeds <1 %
Trabajo del estudiante

71 investigacion.cloududh.com <1 %
Fuente de Internet

72 riubu.ubu.es <1 %
Fuente de Internet

73 Submitted to Kedron State High School <1 %
Trabajo del estudiante

74 Tjaša Matjašič, Tatjana Simčič, Neja Medvešček, Oliver Bajt, Tanja Dreo, Nataša Mori. "Critical evaluation of biodegradation studies on synthetic plastics through a systematic literature review", Science of The Total Environment, 2021 <1 %
Publicación

75 editorialeidec.com <1 %
Fuente de Internet

76 journal-buildingscities.org <1 %
Fuente de Internet

77 repositorio.unprg.edu.pe:8080 <1 %
Fuente de Internet

78 tesis.usat.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

79 www.futureco.net <1 %
Fuente de Internet

 <1 %
Carmen Rosa Carreño Farfán

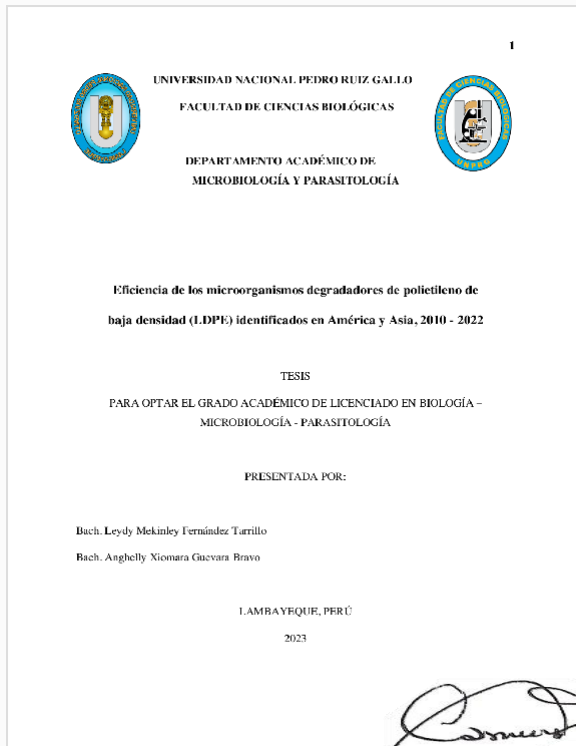


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Leydy Mekinley Fernández Tarrillo Anghelly Xiomara Guevar...
Título del ejercicio: Tesis pregrado
Título de la entrega: Eficiencia de los microorganismos degradadores de polietile...
Nombre del archivo: 14-_Tesis_2_abril_de_2023.docx
Tamaño del archivo: 416.42K
Total páginas: 80
Total de palabras: 23,225
Total de caracteres: 130,835
Fecha de entrega: 05-abr.-2023 12:56p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre... 2056788954





UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUÍZ GALLO

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



ACTA DE SUSTENTACIÓN



ACTA DE SUSTENTACION N° 013-2023-FCCBB-UI

Siendo las 11:00 horas del día 14 de agosto de 2023, se reunieron los Miembros del Jurado evaluador de la tesis titulada "Revisión bibliográfica de la eficiencia de microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010 - 2022", designados por Resolución N° 175-2022-VIRTUAL-FCCBB/D de fecha 09 de julio de 2022, con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

Dra. Graciela Olga Albino Comejo
Dra. Gianina Llontop Barandiarán
MSc. Fransk Amarildo Carrasco Solano
Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

Presidenta
Secretaria
Vocal
Asesora

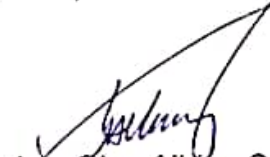
Acto de sustentación fue autorizado por Resolución N° 192-2023-VIRTUAL-FCCBB/D, de fecha 10 de agosto de 2023.


La Tesis presentada y sustentada por la Bachiller LEYDY MEKINLEY FERNÁNDEZ TARRILLO y la Bachiller ANGHELLY XIOMARA GUEVARA BRAVO, tuvo una duración de 30 minutos. Después de la sustentación y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado; se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el calificativo de (Muy Bueno) (19) en la escala vigesimal.

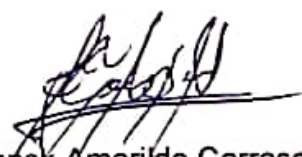
Por lo que la Bachiller LEYDY MEKINLEY FERNÁNDEZ TARRILLO y la Bachiller ANGHELLY XIOMARA GUEVARA BRAVO quedan APTAS para obtener el título profesional de Licenciada en Ciencias Biológicas - Microbiología - Parasitología, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Biológicas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

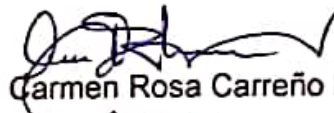
Siendo las 13:40 se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

Firman


Dra. Graciela Olga Albino Comejo,
Presidenta


Dra. Gianina Llontop Barandiarán,
Secretaria


MSc. Fransk Amarildo Carrasco Solano
Vocal


Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán
Asesora

CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo, Carmen Rosa Carreño Farfán, Asesor de Tesis, de la bachiller Leydy Fernández Tarrillo y ____Anghelly Xiomara Guevara Bravo

Titulada: ____Eficiencia de los microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010-2022, , luego de la revisión exhaustiva del documento constato que la misma tiene un índice de similitud de ____17 %_ verificable en el reporte de similitud del programa Turnitin.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Lambayeque, 5____ de __abril ____ de 2023



Apellidos y nombres:
DNI:16494424
ASESOR

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Antecedentes del problema	11
2.1.1. Métodos utilizados para la detección y cuantificación de la degradación microbiana del LDPE	11
2.1.2. Microorganismos degradadores de LDPE	13
2.2. Bases teóricas	16
2.2.1. Métodos de detección de la degradación del LDPE	18
2.2.2. Métodos de cuantificación de la degradación del LDPE.....	21
2.3. Definición de términos básicos	25
III. MÉTODOS Y MATERIALES	26
3.1. Tipo y Diseño de investigación.....	26
3.2. Población y muestra	26
3.3. Método, técnica, instrumentos y procedimiento	26
3.3.1. Método: Método cualitativo	26
3.3.2. Técnica: Técnica cualitativa de tipo observacional (Alvitres, 2000).	26
3.3.3. Instrumento.....	26
3.4. Procedimiento.....	27
a. Revisión sistemática de los artículos científicos sobre la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) publicados en América y Asia, 2010 - 2022	27
b. Comparación de los métodos utilizados para detectar y cuantificar la degradación microbiana de polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010 - 2022	28
c. Diferenciación de las características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos degradadores de LDPE	29
d. Comparación de la eficiencia de los microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) reportados identificados en América y Asia, 2010 - 2022.....	29

3.5. Aspectos éticos	29
3.6. Procesamiento y análisis de datos	29
IV. RESULTADOS	30
4.1. Revisión sistemática de las bases de datos Scopus, Web of Science y Embase sobre las publicaciones de microorganismos degradadores de LDPE identificados en América y Asia, 2010 - 2022.....	30
4.2. Comparación de los métodos utilizados para detectar y cuantificar la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010 - 2022.....	30
4.3. Diferenciación de las características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos degradadores de LDPE identificados en América y Asia, 2010 – 2022	34
4.4. Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) por microorganismos identificadas en América y Asia, 2010 - 2022	42
V. DISCUSIÓN	48
VI. CONCLUSIONES	59
VII. RECOMENDACIONES	60
VIII. REFERENCIAS	61
IX. ANEXOS	73

Índice de tablas

Tabla 1.	Frecuencia de métodos utilizados para la detección y cuantificación de la degradación del LDPE, en publicaciones de América y Asia, 2010 – 2022.....	32
Tabla 2.	Características taxonómicas de bacterias degradadoras del LDPE en América y Asia, 2010 – 2022.....	35
Tabla 3.	Características taxonómicas de hongos degradadoras del LDPE en América y Asia, 2010 – 2022.....	36
Tabla 4.	Frecuencia de los géneros de bacterias y hongos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) reportados en América y Asia, 2010 – 2022.....	41
Tabla 5.	Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de bacterias identificadas en América y Asia, 2010 – 2022.....	43
Tabla 6.	Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de hongos identificados en América y Asia, 2010-2022.....	43
Tabla 7.	Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de consorcios microbianos identificados en América y Asia, 2010 – 2022.....	44
Tabla 8.	Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de los microorganismos identificados en América, 2010 – 2022.....	44
Tabla 9.	Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de bacterias identificadas en Asia, 2010 – 2022.....	45
Tabla 10.	Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de hongos identificados en Asia, 2010 – 2022.....	46
Tabla 11.	Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de consorcios bacterianos identificados en Asia, 2010 – 2022.....	47

Índice de figuras

Figura 1. Proceso de selección de artículos para la revisión sistemática de literatura con el enfoque PRISMA.....	31
Figura 2. Frecuencia de los métodos utilizados para la detección y cuantificación de la degradación microbiana del LDPE en las publicaciones de América 2010 - 2022.....	33
Figura 3. Frecuencia de los métodos utilizados para la detección y cuantificación de la degradación microbiana del LDPE en las publicaciones de Asia 2010 - 2022.....	33
Figura 4. Frecuencia de los microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) reportados en América y Asia, 2010 - 2022.....	37
Figura 5. Frecuencia de bacterias Gram positivas y Gram negativas degradadoras de polietileno de baja densidad (LDPE), reportadas en América y Asia, 2010 - 2022.....	39
Figura 6. Frecuencia de bacilos, cocos y filamentos bacterianos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE), reportados en América y Asia, 2010 - 2022.....	39
Figura 7. Frecuencia de levaduras y mohos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE), reportados en América y Asia, 2010 - 2022.....	40

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar la eficiencia de los microorganismos degradadores del polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010 - 2022. La investigación fue descriptiva, básica-transversal, retrospectiva y bibliográfica, con un diseño no experimental. Se realizó la revisión sistemática de bases de datos Scopus, Web of Science (WOS) y Embase, la comparación de los métodos de detección y cuantificación de la degradación microbiana, se diferenciaron las características taxónomicas y morfológicas de los microorganismos y se comparó la eficiencia de los microorganismos en la degradación del LDPE. En la revisión sistemática se analizaron 45 artículos científicos sobre microorganismos degradadores del LDPE. Los métodos más utilizados (68, 88 %) para la detección de la degradación del polímero fueron Microscopía electrónica de barrido (SEM) y Espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR). El método más utilizado (100 %) para la cuantificación de la degradación del LDPE fue la gravimetría o pesaje. Los microorganismos degradadores correspondieron a los reinos Bacteria en el 62 % y Fungi en el 38 % de las publicaciones. Las bacterias fueron Gram positivas (55 %) y Gram negativas (45 %). La eficiencia en la degradación expresada como pérdida de peso del LDPE reportada en América con bacterias fue de 8, 20 - 30, 80 % y en hongos fue de 0, 66 - 35, 30 % y en Asia fue de 0, 76 - 64, 00 % y 0, 35 - 72, 00 %, en bacterias y hongos respectivamente. Las publicaciones evidenciaron el potencial de los microorganismos para la degradación del LDPE.

Palabras clave: Polietileno, eficiencia, biodegradación, polietileno de baja densidad, microorganismos.

ABSTRACT

The objective of the research was to determine the efficiency of low-density polyethylene (LDPE) degrading microorganisms identified in America and Asia, 2010 - 2022. The research was descriptive, basic-transversal, retrospective and bibliographic, with a non-experimental design. A systemic review of the Scopus, Web of Science (WOS) and Embase databases was carried out, as well as a comparison of the detection and quantification methods of microbial degradation, the taxonomic and morphological characteristics of microorganisms and the efficiency of microorganisms in the degradation of LDPE. In the systematic review, 45 scientists were tested on LDPE-degrading microorganisms. The most used methods (68, 88 %) for the detection of polymer degradation were Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The most used method (100 %) for the quantification of PEBD degradation was gravimetry or weighing. The degrading microorganisms corresponded to the kingdoms Bacteria in 62 % and Fungi in 38 % of the publications. The bacteria were Gram positive (55 %) and Gram negative (45 %). The degradation efficiency expressed in weight loss of LDPE reported in America in bacteria was 8, 20 - 30, 80 % and in fungi it was 0, 66 - 35, 30 % and in Asia it was 0, 76 - 64, 00 % and 0, 35 - 72, 00 %, in bacteria and fungi respectively. The publications indicated the potential of microorganisms for the degradation of LDPE.

Keywords: Polyethylene, efficiency, biodegradation, low-density polyethylene, microorganisms.

I. INTRODUCCIÓN

Los plásticos son moléculas poliméricas sintéticas que se caracterizan por ser versátiles, livianas, con bajo costo y alta durabilidad; sin embargo, al ser persistentes y tener una difícil degradación se convierten en uno de los contaminantes más importantes y frecuentes de los suelos y océanos (Hurley y Nizzetto, 2018; Elías, 2015). En el suelo, los plásticos acumulados reducen la fertilidad y la capacidad de filtración del agua en las plantas (Pramila y Vijaya, 2015), en los océanos la mayoría de los plásticos flotan; no obstante, al ser expuestos al sol se desintegran en pequeños fragmentos denominados microplásticos (Hurley y Nizzetto, 2018; Elías, 2015), los cuales constituyen el 60 - 80 % de los contaminantes marinos (GREENPEACE, 2016).

En el 2018 se alcanzó una producción mundial de 359 millones de toneladas de plástico, de las que el 51 % fue producido por Asia y 22 % por América (Plastics Europe, 2019), siendo los polímeros más comercializados el polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), polietilenotereftalato (PET), poliestireno (PS) y poliamida (Labeaga, 2018), que en promedio constituyen el 96 % de todos los plásticos utilizados en la vida diaria (Streit, 2020).

El LDPE representa el 64 % del polietileno y se utiliza mayormente en forma de bolsas, envolturas y envases, que son descartados luego de ser usados (Moreno, 2018). En el 2016, el consumo fue de 9 millones de toneladas de las cuales solo se recicló el 31 %, debido a que las combinaciones con diferentes materiales y químicos dificultan el proceso de reciclaje (Plastics Europe, 2017). La degradación natural del LDPE es muy lenta; sin embargo, existen reportes de bacterias (*Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp.) y hongos (*Aspergillus* spp., *Fusarium* spp.) que pueden degradar este plástico (Butrón, 2020; Gonzales, 2020; Paul y Kumar, 2015); no obstante, en condiciones de laboratorio la eficiencia de los diversos microorganismos en la degradación del LDPE, varía según el método utilizado para la cuantificación y oscila entre 1 a 35 % (Ndahebwa et al., 2018; Harshvardhan y Bhavanath, 2013).

Los microorganismos aceleran e incrementan la degradación de LDPE; no obstante, su utilización requiere el aislamiento, caracterización y selección con base a su eficiencia en el proceso degradativo. Es por ello que, a través de la presente investigación se planteó el siguiente problema: ¿Cuál es la eficiencia de los microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010 – 2022?. El objetivo principal de la investigación fue determinar la eficiencia de los microorganismos degradadores de LDPE

identificados en América y Asia, 2010 - 2022. Los objetivos específicos fueron: Realizar la revisión sistemática de las bases de datos Scopus, Web of Science (WOS) y Embase sobre las publicaciones de microorganismos degradadores de LDPE identificados en América y Asia, 2010-2022, comparar los métodos utilizados para la detección y cuantificación de la degradación microbiana del LDPE, diferenciar las características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos degradadores de LDPE y comparar la eficiencia de los microorganismos degradadores de LDPE reportados en América y Asia, 2010 - 2022.

El conocimiento obtenido en los reportes de microorganismos degradadores de LDPE publicados en América y Asia, 2010 - 2022 servirá de guía para posteriores investigaciones en ensayos relevantes y pertinentes que demuestren la degradación del polímero contaminante por microorganismos aislados de diferentes ambientes, con la perspectiva de utilizarlos para la biorremediación de ambientes impactados por LDPE.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Métodos utilizados para la detección y cuantificación de la degradación microbiana del LDPE

En la detección y cuantificación de la degradación del LDPE se utilizan la microscopía de fuerza atómica (AFM), calorimetría por escaneo diferencial (DSC), espectroscopía infrarroja (FT-IR), cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC), cromatografía de permeación en gel (GPC) y de alta temperatura (HT-GPC), espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN), microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (XRD), espectroscopía UV-visible, cromatografía en capa fina (TLC), espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS), análisis termogravimétrico (TGA), termogravimetría / termogravimetría derivada / análisis térmico diferencial (TG-DTG-DTA) y gravimetría (Matjašič et al., 2021; Jaysree et al., 2019; Gajendiran et al., 2016; Das y Kumar, 2015; Quinchía y Maya, 2015; Esmaeili et al., 2013; Pramila y Vijaya, 2011_a; Uribe et al., 2010).

Diversos investigadores de la degradación microbiana del LDPE han utilizado estos métodos y se han registrado estudios en Perú (Uribe et al., 2010); Colombia (Quinchía y Maya, 2015); China (Samanta et al., 2020), Eslovenia (Matjašič et al., 2021), India (Gajendiran et al., 2016; Jaysree et al., 2019; Pramila y Vijaya, 2011_b) e Irán (Esmaeili et al., 2013), los cuales sirven de referencia para continuar con futuros estudios y brindar la mejor solución para la degradación del LDPE contaminante.

Matjašič et al. (2021) realizaron una revisión sistemática de 145 artículos científicos, publicados en las bases de datos de WOS y Scopus en los últimos 50 años. Los autores determinaron que el 33, 8 % de las investigaciones se realizaron en la India y el 20 % experimentaron con el LDPE. Los métodos reportados fueron la gravimetría o pesaje, SEM, FTIR, GPC, la GPC de alta temperatura, la espectroscopía UV-visible, TLC, GC-MS, HPLC, XPS y RMN. El 15, 9 % de estudios informaron sobre la pérdida de peso, los cambios superficiales, químicos y resistencia a la tracción del plástico; el 27, 6 y 25, 5 % de las investigaciones utilizaron la combinación de dos y más de tres métodos, respectivamente; el 6, 9 % utilizaron el Test de STURM y solo 8, 4 y 10 % de las investigaciones midieron el perfil térmico del plástico por TGA, TG-DTG-DTA y DSC, respectivamente.

Samanta et al. (2020) determinaron la eficacia de *Bacillus tropicus* en la degradación del LDPE, durante 40 días. Para el análisis de la degradación del polímero se utilizaron los métodos de detección AFM, FTIR y SEM y para la cuantificación la gravimetría. Mediante SEM y AFM se observó la presencia de rugosidades, pliegues y grietas en la superficie del polietileno y por FTIR se detectó la desaparición de grupos carbonilo en la estructura polimérica. Asimismo, se obtuvo una reducción del peso del polímero de 10, 15 %. Se concluyó que *B. tropicus* es eficaz en la degradación de las películas de LDPE.

Jaysree et al. (2019) realizaron una revisión sistemática sobre la biodegradación de petroplásticos, haciendo uso de diversas bases de datos del internet. Se determinó que los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Brevibacillus*, *Streptomyces* y *Aspergillus* son los más eficientes en la degradación de plásticos por acción de las enzimas hidroxilasas, lipasas y lacasas, entre otras. Los métodos de detección y cuantificación más utilizados en la degradación microbiana fueron AFM, DSC, FTIR, RMN, SEM y XRD. Asimismo, se determinó que la mayoría de microorganismos degradadores se aislaron del suelo de vertederos y entre las especies identificadas el 20 % de *Bacillus* sp. degradó LDPE y PLA y el 15 % de *Pseudomonas* sp. HDPE y PLA.

Gajendiran et al. (2016) estudiaron la capacidad de degradación del LDPE por hongos aislados del suelo de un relleno sanitario, durante un periodo de 90 días. Mediante el análisis de ARNr 18S, se identificó a *Aspergillus clavatus* y la detección y cuantificación de la degradación del plástico se investigaron mediante gravimetría, evolución del dióxido de carbono en la prueba de STURM, AFM, FT-IR y SEM. Se determinó 35 % de pérdida de peso; 2, 32 gL⁻¹ de dióxido de carbono producido, presencia de grietas, erosiones, pliegues, fracturas y cambios en la estructura de la cadena polimérica. Se demostró el potencial de *A. clavatus* para degradar el LDPE.

Quinchía y Maya (2015) investigaron la capacidad *Pycnoporus sanguineus* (UTCH03) para degradar LDPE, durante 180 días. Se utilizaron la SEM, FTIR, DSC y gravimetría para determinar los cambios superficiales, estructurales, cristalinidad y pérdida de peso en el material, respectivamente. Se observaron estructuras reproductivas, cavidades y fracturas; incremento de las bandas poliméricas (1200 - 1300 cm⁻¹) y la temperatura de fusión (de 116, 50 a 115, 23 °C) y 66 % de pérdida de peso del plástico. Los métodos utilizados permitieron corroborar la utilización del polímero como fuente de carbono y consecuentemente la degradación por *P. sanguineus*.

Esmaeili et al. (2013) evaluaron la capacidad de *Aspergillus* sp. y *Lysinibacillus* sp. en la degradación del LDPE, durante 126 días. Para el ensayo se utilizaron películas de LDPE con y sin irradiación de luz ultravioleta (UV), sin aditivos prooxidantes y en presencia y ausencia de cultivos microbianos mixtos. En la detección y cuantificación de la degradación del LDPE se usaron FT-IR, SEM y XRD, para confirmar los cambios estructurales, morfológicos y superficiales del polímero. Se obtuvo una degradación del plástico de 29,5 y 15,8 % por acción de *Aspergillus* sp. y *Lysinibacillus* sp. en LDPE irradiado y no irradiado, respectivamente. Se concluyó que el LDPE irradiado con UV es fácilmente degradado por los microorganismos.

Pramila y Vijaya (2011a) evidenciaron la capacidad de *Mucor circinelloides* y *Aspergillus flavus* para degradar el LDPE. Se utilizó la SEM para observar cambios en la superficie polimérica y la técnica STURM para medir el dióxido de carbono (CO₂) liberado como producto de metabolismo de los hongos. Se observó la presencia de grietas y formación de agujeros y una producción de 5,9 gL⁻¹ de CO₂ por *M. circinelloides* y 4,4 gL⁻¹ por *A. flavus*. Se concluyó que las dos cepas microbianas utilizaron el polímero como única fuente de carbono y que la producción de CO₂ reflejó la degradabilidad positiva del LDPE.

Uribe et al. (2010) estudiaron la capacidad de *Pseudomonas* sp. (MP3a y MP3b), *Penicillium* sp. (MP3a), *Rhodotorula* sp. (MP3b), *Hyalodendron* sp. (MP3c) y una levadura en la degradación de LDPE, durante 60 días. En la detección y cuantificación se utilizó la FTIR para el análisis estructural del polímero y una balanza analítica para medir la pérdida de peso del plástico. Se obtuvo una reducción de 83,89 % del índice de carbonilo a pH 7, 4,08 % a pH 5, 5,19, 77 % a pH 7 y 6,47 % a pH 5, 5 en las terminaciones con dobles enlaces y una pérdida de peso de 5,4 y 4,8 % a pH 7, 0 y 5, 5 con el consorcio microbiano. Se concluyó que los microorganismos degradan el LDPE.

2.1.2. Microorganismos degradadores de LDPE

La degradación microbiana del polietileno de baja densidad (LDPE) ha sido investigada en el Perú (Butrón, 2020; Gonzales, 2020; Portella, 2019), Corea (Yeong y Gyun, 2019) e India (Das y Kumar, 2015; Harshvardhan y Bhavanath, 2013) y dependiendo de los métodos de detección y cuantificación utilizados se han reportado alteraciones físicas (Butrón, 2020), 1,75 – 35,72 % de pérdida de peso (Ndahebwa et al., 2018; Harshvardhan y Bhavanath, 2013), cambios en la

estructura y presencia de picos oxidativos en los espectros FTIR (Delacuvellerie et al., 2019) y 1, 7 - 12, 0 % de mineralización hasta dióxido de carbono (Das y Kumar, 2015).

Butrón (2020) investigó la biodegradación del LDPE por *Pseudomonas aeruginosa*, considerando diferentes condiciones de pH (5, 0 y 7, 0) y temperatura (25 y 35 °C) durante 30 días. En el análisis cuantitativo se determinó el peso del plástico en una balanza analítica y en el cualitativo se utilizó el estereoscopio, microscopio compuesto y microscopio de fluorescencia. Se determinó 21, 7 y 27, 3 % de pérdida de peso del polietileno a pH 7,0, con temperaturas de 25 y 35 °C, respectivamente, corrosión de la superficie, formación de agujeros, grietas, fragmentación, decoloración y biopelículas en la superficie del plástico. Se concluyó que *P. aeruginosa* degrada el LDPE, bajo condiciones de pH y temperatura óptimos.

Gonzales (2020) determinó la degradación de LDPE por *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *A. fumigatus*, *Mucor* sp. y *Fusarium* sp. aislados de un botadero de residuos municipales. El ensayo se realizó bajo dos pH (4, 5 - 8, 0) y dos temperaturas (20 y 30 °C), durante 20 días. Se evaluó la degradación física del material utilizando un estereoscopio y se consideró una escala de calificación muy buena, buena, regular y pobre. *A. flavus* obtuvo una calificación “muy buena”, *A. niger* “buena”, *A. fumigatus* y *Fusarium* sp. “regular” y *Mucor* sp. “pobre”. Se concluyó que la temperatura y el pH influyen en la degradación del LDPE por *A. flavus* y *A. niger*.

Delacuvellerie et al. (2019) estudiaron durante 60 días, la degradación de LDPE realizada por bacterias aisladas de plásticos contaminantes del mar Mediterráneo. La evaluación del proceso degradativo se realizó mediante el monitoreo del peso con una balanza analítica, observación de biopelículas formadas sobre el plástico y FTIR. Con *Alcanivorax borkumensis* se determinó 3, 5 % de pérdida de peso del polímero, biopelículas formadas en el 68 % del área investigada y presencia de picos oxidativos en los espectros FTIR, que confirmaron el cambio estructural en el polímero después de 96 - 144 horas. Se demostró que *A. borkumensis* degrada el LDPE.

Olagoke et al. (2019) investigaron la degradación de bolsas de LDPE, durante 14 días, por acción de bacterias y hongos, previamente aislados de vertederos de residuos sólidos. La degradación se evaluó a pH 7, 2 a 37 °C, con una balanza analítica para determinar la pérdida de peso y con FTIR para los cambios estructurales del polímero. Se obtuvo una pérdida de peso de 3, 75 % por acción del consorcio *Pseudomonas* sp., *Acinetobacter* sp., *Bacillus* sp.1, y *Bacillus* sp.2; 1, 67 % con *A. flavus*, *Staphylococcus* sp. más el primer consorcio y por FTIR se observaron

picos de estiramiento C-H y vibración de balanceo de CH₂ en el polímero. Se concluyó que el LDPE pueden ser utilizado y biodegradado por consorcios microbianos.

Yeong y Gyun (2019) estudiaron durante 60 días la degradación de micro-plásticos de polietileno por acción de un cultivo mixto de *Bacillus* sp. y *Paenibacillus* sp. aislados en un relleno sanitario. Se utilizó una balanza analítica para determinar el peso perdido, FE-SEM para observar el cambio físico y estructural del polímero y FTIR y GC-MS para confirmar la degradación. Se determinó una pérdida de peso de 14, 7 %; disminución del diámetro de la muestra de 22, 8 %, aparición de grietas y agujeros en la superficie y presencia de nuevos grupos funcionales. Se evidenció que el cultivo bacteriano mixto de *Bacillus* sp. y *Paenibacillus* sp. aceleró la degradación de los microplásticos de polietileno.

Portella (2019) aisló 17 especies fúngicas y seleccionó a *Geotrichum* sp., *Aspergillus* sp. (1 y 2), *Fusarium* sp. y *Oidium* sp. para estudiar su acción degradativa en el LDPE, durante 60 días. En el ensayo se investigaron tres concentraciones del polímero: 0, 01; 0, 025 y 0, 05 g por litro de medio BHI y la degradación realizada por cada hongo se determinó considerando la pérdida de peso registrada en una balanza analítica. *Geotrichum* sp. degradó el 28, 44 y 18 %; *Aspergillus* sp. 80, 34, 4 y 18 %; *Aspergillus* sp. 2, 60, 50 y 49 %; *Fusarium* sp. 18, 11, 6 y 11 %; y *Oidium* sp. 68, 27, 6 y 30, 6 % en las concentraciones de 0, 01; 0, 025 y 0, 05 g de LDPE, respectivamente. Se demostró que *Geotrichum* sp., *Aspergillus* sp. (1 y 2), *Fusarium* sp. y *Oidium* sp. degradan el LDPE.

Ndahebwa et al. (2018) aislaron bacterias y hongos de los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Brevibacillus*, *Cellulosimicrobium*, *Lysinibacillus* y *Aspergillus* e investigaron su capacidad para degradar el LDPE, durante 112 días. La pérdida de peso se evaluó con una balanza analítica y los cambios estructurales con FTIR y GC-MS. Se determinó una disminución de peso de $36, 4 \pm 5, 53$ % (*Aspergillus oryzae*, A5,1 - MG779508; $35, 72 \pm 4, 01$ % (*Bacillus cereus* A5, a - MG645264); $20, 28 \pm 2, 30$ % (*Brevibacillus borstelensis*, B2, 2 - MG645267); cambios estructurales y formación de productos intermedarios (aldehídos, alcoholes y cetonas). Se concluyó que los microorganismos del suelo son eficientes en la degradación del LDPE.

Das y Kumar (2015) investigaron durante 60 días la degradación del LDPE por dos cepas de *B. amyloliquefaciens* (BSM-1 y BSM-2) aisladas de residuos sólidos del relleno sanitario municipal. Para analizar la biodegradación del polímero se observaron los cambios en la superficie

por SEM, cambios estructurales por FTIR, la pérdida de peso y la mineralización por cuantificación del dióxido de carbono perdido (test de STURM). Se obtuvo una pérdida de peso de 11 % (BSM-1) y 16 % (BSM-2), presencia de grietas, agujeros, biopelículas por la adhesión bacteriana y niveles de mineralización de 12 % (BSM-1) y 1,7 % (BSM-2). Se concluyó que las dos cepas bacterianas tienen buena capacidad para degradar LDPE.

Harshvardhan y Bhavanath (2013) analizaron durante 30 días la capacidad biodegradativa del LDPE en 60 bacterias aisladas de aguas pelágicas. La pérdida de peso se determinó con una balanza analítica y el cambio de la estructura polimérica por FTIR. Se registró pérdida de peso de 1,150 - 1,75 % en el LDPE tratado con tres cepas bacterianas identificadas como *Kocuria palustris* M16, *Bacillus pumilus* M27 y *B. subtilis* H1584. También se determinó aumento en los índices de los enlaces cetocarboxilo, éster carboxilo y vinilo. Se concluyó que *B. subtilis* H1584 fue más eficiente en la degradación de polietileno de baja densidad.

2.2. Bases teóricas

El polietileno es un tipo de termoplástico sintético formado por polímeros de cadena repetitiva de etileno $(CH_2)_n$, que se caracteriza por presentar excelentes propiedades mecánicas (escaso desgaste y resistencia al choque y a la flexión) y térmicas (soporta -200 a 80 °C y baja conductividad), además de ser químicamente inerte (Coreño y Méndez, 2010). Según su densidad el polietileno se clasifica en polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE), los cuales se encuentran formando parte de diversos materiales como bolsas de plástico, botellas, envases, películas, juguetes y tuberías (Cardona et al., 2010).

El polietileno de baja densidad (LDPE) está formado por cadenas muy ramificadas que le permiten tener una densidad de 0,910 - 0,940 g/cm³, no reacciona a temperatura ambiente, excepto a fuertes agentes oxidantes y algunos disolventes que provocan su hinchazón. Este plástico puede ser opaco, traslúcido, flexible o duro y se utiliza en la producción de bolsas, envases, films, tapas flexibles y botellas (Plastics Europe, 2019; Cardona et al., 2010). Su degradación natural tarda aproximadamente 400 años (Ministerio del Ambiente, 2018), es por ello que se utiliza la degradación térmica, mecánica, química, fotoquímica y biológica con el fin de evitar su acumulación y acelerar su degradación (Posada, 2012).

La biodegradación del polietileno de baja densidad es el proceso de destrucción y/o asimilación del polímero llevado a cabo por organismos vivos, principalmente bacterias y hongos (Posada, 2012). Este proceso implica la unión de los microorganismos a la superficie del plástico, la utilización del polímero como fuente de carbono, la degradación del polímero en oligómeros, dímeros y monómeros y finalmente la mineralización a dióxido de carbono, sales minerales y agua en aerobiosis o metano en condiciones anaerobias (Labeaga, 2018). Los microorganismos producen y secretan al medio enzimas como peroxidasas, alcano hidrolasas, xilanasas, celulasas y lacasas, que son las responsables de la ruptura de la cadena polimérica en fragmentos de bajo peso molecular (Ghatge et al., 2020).

El grado de biodegradación del polietileno es parcial y depende del tipo de microorganismo a utilizar y de las características físicas, estructurales y pretratamiento del polímero, además de las condiciones ambientales como temperatura, humedad y pH (Sen y Raut, 2015). La característica hidrofóbica y el alto peso molecular del polietileno, limitan la adhesión y colonización de los microorganismos (Wang et al., 2012), es por ello que se utilizan pretratamientos como la radiación UV y el uso de prooxidantes para volver susceptible al plástico del ataque microbiano (Minh et al., 2018).

Las bacterias de los géneros *Bacillus*, *Brevibacillus*, *Cellulosimicrobium*, *Comamonas*, *Delftia*, *Enterobacter*, *Idonella*, *Kocuria*, *Lysinibacillus*, *Paenibacillus*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Rhodotorula*, *Stenotrophomonas* y *Streptomyces* (Butrón, 2020; Yeong y Gyun, 2019; Ndahebwa et al., 2018; Das y Kumar, 2015; Harshvardhan y Bhavanath, 2013), además de diversas especies de hongos de los géneros *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Geotrichum*, *Hyalodendron*, *Mucor*, *Oidium* y *Penicillium* son frecuentemente utilizados en el laboratorio para degradar el LDPE (Ghatge et al., 2020; Gonzales, 2020; Portella, 2019; Yeong y Gyun, 2019; Gajendiran et al., 2016; Esmaeili et al., 2013).

Los métodos para la detección y cuantificación de la biodegradación del LDPE permiten determinar qué microorganismos son más eficientes como degradadores de este material. Mediante los métodos de detección se observan cambios físicos del material como grietas, hoyos, fragmentación, cambio de color y rugosidad superficial, además de cambios estructurales del polímero como ruptura de enlaces y formación de productos intermediarios (Ren et al., 2019). Por su parte, los métodos cuantitativos permiten determinar la cantidad de polietileno degradado, cuyos resultados se expresan en su mayoría a través de porcentajes de pérdida de peso del plástico

(Rajandas et al., 2012).

En la detección y cuantificación de la degradación del LDPE se utiliza la microscopía óptica y de fluorescencia, balanzas analíticas, AFM, SEM, FTIR, RMN, GPC, GC-MS, DSC, XRD y otros (Das y Kumar, 2015; Mahalakshmi, 2014; Esmaili et al., 2013;). Asimismo, el test de STURM es ampliamente utilizado en la determinación del dióxido de carbono liberado como producto del metabolismo de los microorganismos. De igual manera, se investiga la resistencia a la tensión del material biodegradado o la capacidad de adherencia de los microorganismos a través del BATH, e incluso se determina la pérdida de peso a diferentes temperaturas a través de la termogravimetría (Gajendiran et al., 2016; Konduri et al., 2011).

La eficiencia de los microorganismos degradadores del LDPE se evidencia en los cambios físicos (color, estrías, fragmentación, grietas y agujeros) y estructurales (ruptura de enlaces y formación de productos intermediarios), formación de biopelículas y porcentaje de peso perdido del plástico (Ghatge et al., 2020; Ndahebwa et al., 2018; Das y Kumar, 2015). Para la evaluación de la biodegradación del polímero, se utilizan diversos métodos de detección y cuantificación como SEM y AFM, balanza analítica, FTIR, GC-MS, HPLC, XRD y la técnica de STURM que han sido reportados en diversas investigaciones en América y Asia (Ghatge et al., 2020; Ren et al., 2019).

2.2.1. Métodos de detección de la degradación del LDPE

a. Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy, SEM) detecta la degradación bacteriana y fúngica del LDPE a través de imágenes de la superficie de la muestra con una resolución nanométrica en un tiempo determinado por el investigador, en el cual se observan biopelículas microbianas, estructuras reproductivas de hongos, colonización fúngica (Perera et al., 2021; De Silva et al., 2019; Hikmah et al., 2018; Thamizhmarai y Kannahi, 2018; Gajendiran et al., 2016; Quinchía y Maya, 2015; Pramila y Vijaya, 2011a) y se verifica la penetración de las hifas en el plástico (Awasthi et al., 2017), lo que refleja la adaptación y asimilación del polímero como fuente de carbono por parte de los microorganismos y excluye a aquellos que no muestran una degradación significativa.

La microscopía electrónica de barrido también permite diferenciar el cambio físico de la superficie del LDPE antes y después del ataque microbiano, con deformaciones superficiales, microgrietas (Kyaw et al., 2012), cavidades, fracturas, grietas, agujeros (Chaudhary et al., 2021;

Dey et al., 2020; Li et al., 2020; Bardají et al., 2019; De Silva et al., 2019; Gupta y Devi, 2019; Sáenz et al., 2019; Hikmah et al., 2018; Munir et al., 2018_b; Gajendiran et al., 2017; Gajendiran et al., 2016; Das y Kumar, 2015; Quinchía y Maya, 2015; Bhatia et al., 2014; Esmaeili et al., 2013; Pramila y Vijaya, 2011_a; Pramila y Vijaya, 2011_b), picaduras, erosión y rugosidad en la superficie del plástico (Soleimani et al., 2021).

b. Espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier

En la espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) se utilizan láminas del LDPE que son analizadas través de un equipo FTIR antes y después de ser sometidas al ataque microbiano o con la muestra y blanco respectivo (Nadeem et al., 2021; Thamizhmarai y Kannahi, 2018; Ojha et al., 2017; Quinchía y Maya, 2015; Uribe et al., 2010). Esta técnica detecta la formación de grupos carbonilos, anillos aromáticos y productos intermediarios como ácidos, alcoholes, aldehídos, cetonas, fenoles y ésteres (Saira et al., 2022; Maroof et al., 2021; Gupta y Devi, 2020; Li et al., 2020; Ojha et al., 2017; Abraham et al., 2016; Pramila y Vijaya, 2015; Quinchía y Maya, 2015; Esmaeili et al., 2013).

FTIR también permite observar la desaparición y escisión de grupos carbonilo, hidroxilos y de dobles enlaces terminales (Maroof et al., 2021; Gupta y Devi, 2020; Li et al., 2020; Bardají et al., 2019; Gupta y Devi, 2019; Jayaprakash y Palempalli, 2018; Skariyachan et al., 2017), el estiramiento de las cadenas $\text{-C}\equiv\text{C-}$, N-H , C=O del grupo aldehído y C-O del grupo éter, $\text{C-C}=\text{C}$ simétrico del anillo aromático, C-H de grupos alquinos, OH de carboxílicos (Soleimani et al., 2021; De Silva et al., 2019; Gajendiran et al., 2017; Ojha et al., 2017; Gajendiran et al., 2016), la flexión simétrica y asimétrica de CH_2 (Bhatia et al., 2014), modificación de los enlaces, reducción del espectro del número de onda del grupo metileno (-CH_2) y variación en los picos (Gupta y Devi, 2019; Islami et al., 2019; Munir et al., 2018_b; Ojha et al., 2017; Bhatia et al., 2014). FTIR también cuantifica la degradación microbiana del LDPE a través del porcentaje de reducción de los índices de C-O y C=C los cuales son de naturaleza invariante (Uribe et al., 2010).

La FTIR también es utilizada junto a la técnica de reflectancia total atenuada (FTIR - ATR), para facilitar el estudio de muestras tratadas en medios acuosos y permiten la observación de cambios en los enlaces y grupos funcionales en la columna de polietileno, la formación de nuevos enlaces, presencia de nuevos grupos de alcanos, nitros, acilos y carbonilos, escisión de las cadenas $\text{H}_2\text{C}=\text{C-}$ y el estiramiento de los enlaces N-O debido al tratamiento biótico al que fue sometido el plástico (Liu et al., 2022; Khandare et al., 2021; Dey et al., 2020).

c. Microscopía de fuerza atómica

El microscopio de fuerza atómica (Atomic Force Microscopy, AFM), es un instrumento mecano-óptico capaz de detectar cambios en la topografía superficial del polietileno (Abraham, et al. 2016), utilizando una velocidad de 1,0 Hz, con diferentes resoluciones dependiendo del investigador (Dey et al., 2020; Awasthi et al., 2017; Gajendiran et al., 2017; Ojha et al., 2017; Abraham et al., 2016; Gajendiran et al., 2016). A través de esta técnica se visualizan las ranuras, corrosiones y picaduras de la superficie de la película de LDPE (Waqas et al., 2021; Dey et al., 2020; Tribedi y Sil, 2013), formación de surcos (Awasthi et al., 2017; Ojha et al., 2017), desarrollo de grietas (Ojha et al., 2017), superficies rugosas (Gajendiran et al., 2017; Abraham et al., 2016;), fracturas y erosiones leves por la acción de microorganismos (Gajendiran et al., 2016).

d. Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo

El microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (Field Emission Gun Scanning Electron Microscopy, FE-SEM) al igual que SEM hace posible la información procedente de la superficie de la muestra en estudio, pero con mayor resolución y con un rango de energía mucho mayor. Se observa la adherencia de las colonias bacterianas, la unión de las esporas y formación de redes de micelio en los hongos, así como también se verifica la capacidad degradativa de los microorganismos, reflejado en la presencia de surcos, grietas, erosiones, cavidades, picaduras y rugosidades de la superficie del LDPE en estudio (Khandare et al., 2021; Ojha et al., 2017; Skariyachan et al., 2017).

e. Microscopía óptica y de fluorescencia

La microscopía óptica y de fluorescencia detecta la degradación de la película de LDPE. Mediante el microscopio óptico se observa la pérdida del color, del brillo, de porosidades, fisuras, rugosidades, grietas (Butrón, 2020; Duddu et al., 2015; Das y Kumar, 2014; Muthumani y Anbuselvi, 2014) y zonas de aclaramiento en el polímero (Thilagavathi et al., 2018). La microscopía electrónica detecta la presencia de esferolitas cristalinas en la superficie del plástico (Sarker et al., 2020; De Silva et al., 2019) y la microscopía de fluorescencia las biopelículas, biocapas o biofilms las cuales son teñidas con fluorocromos como la rodamina B (Butrón, 2020).

f. Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas

La cromatografía de gases/ espectrometría de masas (Gas chromatography/Mass spectrometry, GC-MS) está equipada con una columna HP 5MS (Abraham et al., 2016; Pramila y Vijaya, 2015; Kyaw et al., 2012) a una temperatura programada que difiere según los autores y el

MS con un modelo Elite - 5MS (Abraham et al., 2016). Identifica productos de la degradación microbiana de la cadena plegada del polímero como son el fenol y alcanos como dodecano, octadecano, tetracosano, pentacosano y hexacosano (Liu et al., 2022; Khruengsai et al., 2021; Abraham et al., 2016; Kyaw et al., 2012), ácidos grasos como ácido hexadecanoico y ácido octanoico (Pramila y Vijaya, 2015; Kyaw et al., 2012), hidrocarburos aromáticos (Pramila y Vijaya, 2015), grupo éster de alcohol y otros compuestos desconocidos (Kyaw et al., 2012).

g. Cromatografía de gases con detector de ionización de llama

La cromatografía de gases con detector de ionización de llama (Gas chromatography with flame ionization detector, GC-FID) reconoce hidrocarburos lineales que se producen por la hidrólisis del LDPE, cuya estructura normal presenta hidrocarburos alcanos lineales intactos pegados entre sí. El peso molecular del polímero disminuye debido a la acción de las enzimas que oxidan y/o hidrolizan las cadenas de este polímero, en liberación de alcanos, aldehídos o ácidos carboxílicos, los cuales son utilizados como fuente de carbono por microorganismos (Montazer et al., 2020).

h. Espectroscopía de resonancia magnética nuclear

La espectroscopía de resonancia magnética nuclear (Nuclear magnetic resonance, RMN) es una técnica utilizada para detectar los espectros, picos formados y productos finales como grupos metilos y aldehídos que se forman debido a la acción degradativa de los microorganismos sobre la superficie de la película del LDPE (Skariyachan et al., 2017).

2.2.2. Métodos de cuantificación de la degradación del LDPE

a. Gravimetría

La gravimetría o pesaje es ampliamente utilizado para cuantificar la biodegradación de las películas de LDPE, a través de porcentaje de pérdida de peso que presentan las muestras luego de ser tratadas con diversos microorganismos. Después del tiempo de duración del ensayo (4 - 180 días) se separa el material plástico, se desinfecta para eliminar la película o biofilm generado en la superficie con etanol al 70 %, dodecil sulfato de sodio (SDS) al 2 %, sal mineral o cloruro de mercurio al 0,1 %, durante 15 - 240 minutos, se lava con agua destilada estéril por 10 - 20 minutos, se seca en la estufa durante 15 minutos - 24 horas a 40 - 60 °C y se pesa.

Para determinar el porcentaje de pérdida de peso se considera el peso inicial y el peso final de la muestra de LDPE (Maleki et al., 2022; Saira et al., 2022; Chaudhary et al., 2021; Maroof et al., 2021; Nadeem et al., 2021; Soleimani et al., 2021; Waqas et al., 2021; Butrón, 2020; Dey et

al., 2020; Montazer et al., 2020; Gupta y Devi, 2020; Bardají et al., 2019; De Silva et al., 2019; Gupta y Devi, 2019; Islami et al., 2019; Sáenz et al., 2019; Hikmah et al., 2018; Jayaprakash y Palempalli, 2018; Munir et al., 2018_a; Thamizhmarai y Kannahi, 2018; Thilagavathi et al., 2018; Gajendiran et al., 2017; Abraham et al., 2016; Gajendiran et al., 2016; Das y kumar, 2015; Kumar et al., 2015; Quinchía y Maya, 2015; Bathia et al., 2014; Muthumani y Anbuselvi, 2014; Kyaw et al., 2012; Pramila y Vijaya, 2011_a; Uribe et al., 2010). El cálculo se realiza con las fórmulas:

$$\text{Pérdida de peso \%} = (\text{peso inicial} - \text{peso final}) \times 100 / \text{peso inicial}$$

$$\text{Pérdida de peso \%} = 100 - \text{peso final en mg (Montazer et al., 2020)}.$$

b. Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción mide la tensión máxima que puede llegar a soportar el LDPE biodegradado sin romperse luego de ejercerle una fuerza de estiramiento. Para que esta técnica se pueda realizar se utilizan máquinas de prueba universal, de ensayo de tracción de baja carga axial y de materiales (Modelo INSTRON 4206) con una velocidad de cruceta de 10 mm / min., que pueden variar de acuerdo al investigador (Khruengsai et al., 2022; Perera et al., 2021; Soleimani et al., 2021; Sarker et al., 2020; Munir et al., 2018_a; Awasthi et al., 2017; Tribedi y Sil, 2013).

c. Prueba de STURM

La prueba de STURM estudia la evolución del dióxido de carbono (CO₂), como resultado de la degradación de la cadena polimérica. El CO₂ liberado queda atrapado en un matraz de absorción que contiene KOH (1 M), al cual se añade una solución de cloruro de bario (BaCl₂ -0,1 M) y como resultado se forman precipitados de BaCl₂. Este último se calcula gravimétricamente midiendo la cantidad de precipitados de CO₂ desprendido (Gajendiran et al., 2017; Abraham et al., 2016; Gajendiran et al., 2016; Das y Kumar, 2015; Esmaeili et al., 2013; Pramila y Vijaya, 2011_a; Pramila y Vijaya, 2011_b).

La producción de CO₂ también se estima usando el método de titulación disuelto, para lo cual se toma una muestra (25 mL) en un matraz cónico, se añaden 0,05 mL de solución de tiosulfato 0,1 N y después de la adición de dos gotas de indicador de naranja de metilo, esta solución se valora frente a una solución de hidróxido de sodio 0,02. El punto final es el cambio de color de rojo anaranjado a amarillo, luego se agrega dos gotas de indicador de fenolftaleína y la titulación continua hasta que se desarrolle un color rosa. Finalmente se anotan los volúmenes del valorante utilizado y se calcula la cantidad de CO₂ mediante la fórmula: $(A \times B \times 50 \times 1000) / V$ (Pramila et al., 2012; Pramila y Vijaya, 2011_a). Dónde: A = mL de titulante de NaOH. B = Normalidad de

NaOH.V = mL de la muestra.

d. Prueba de adhesión bacteriana a hidrocarburos

La prueba de adhesión bacteriana a hidrocarburos (Bacterial adhesion test to hydrocarbons, BATH) permite calcular la hidrofobicidad de las superficies bacterianas que al degradar el LDPE, tendrán cierta afinidad a hidrocarburos como el hexano (Dey et al., 2020; Gupta y Devi, 2019). Si estos microorganismos son sometidos a enriquecimiento se observará una mayor capacidad de adherencia a la superficie del polietileno, mejorando la formación de las biopelículas y por tanto la degradación del plástico. Para determinar el porcentaje de adherencia de los microorganismos al hidrocarburo se utiliza la siguiente fórmula: Hidrofobicidad de la superficie celular (%) = $100 \times \{(\text{OD inicial} - \text{OD final}) / \text{OD inicial}\}$ Donde: OD = Densidad óptica.

e. Espectroscopía de rayos X por dispersión en energía

La espectroscopía de rayos X por dispersión en energía (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) se utiliza para hacer una caracterización química de las tiras reactivas del polímero de LDPE y así poder registrar la degradación y la disminución del porcentaje de carbono luego de ser sometido a la acción de los microorganismos. Se utiliza un equipo que detecta la radiación X que emite el material, éste enfoca un haz de alta energía de partículas de rayos X, las cuales son medidos por el espectrómetro de dispersión de energía debido a los rayos X que el polímero emite, verificándose el nivel de degradación del plástico (Liu et al., 2022; Skariyachan et al., 2017).

f. Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico (Thermal Gravimetric Analysis, TGA) determina el peso perdido del LDPE a diversas temperaturas, para lo cual se comprueba el perfil térmico de la hoja del polímero antes y después del ensayo para conocer la influencia de la degradación microbiana implicada, mostrándose un perfil térmico del LDPE no biodegradado a 450 - 500 °C. El análisis termogravimétrico del plástico sometido a la acción de microorganismos muestra una pérdida de peso de 21, 65, 33 y 46 % luego de ser sometido a 50, 100 y 175 °C, respectivamente y se demuestra de esta forma que los microorganismos debilitan el plástico y lo vuelven más susceptible a las temperaturas a diferencia del material intacto, no alterado por los microorganismos (Maleki et al., 2022; Chaudhary et al., 2021; Bhatia et al., 2014).

g. Análisis de difracción de rayos X

El análisis de difracción de rayos X (X-ray diffraction, XDR) cuantifica el grado de cristalinidad de las películas de LDPE después de realizada la biodegradación, a través de un

difractómetro de rayos X tipo Rigaku-SmartLab, Japón o D5000-difractómetro Siemens, que funcionan de forma totalmente automática (Maroof et al., 2021; Esmaeili et al., 2013). Este difractómetro utiliza radiación dispersa que se registra con un rango de 10-40 grados 2θ sobre las películas de polímero en condiciones de funcionamiento constantes a temperatura ambiente, luego se analizan los picos para calcular el porcentaje de cristalinidad de la muestra y se procesan diversos picos alrededor de 19, 21 y 23,7 a 2θ en datos XRD usando originPro8.5 (Maroof et al., 2021) a través de la siguiente fórmula: % cristalinidad = $(A2 + A3) / (A1 + A2 + A3) * 100$

Dónde: A1 (área integrada del pico amorfo alrededor de 19,21 θ) y A2 y A3 (áreas integradas de los picos cristalinos).

El porcentaje de cristalinidad del LDPE aumenta después de aproximadamente 3 meses de incubación con aislados bacterianos seleccionados, debido a que cuando el polímero se expone a los microorganismos, éstos atacan principalmente las regiones amorfas menos resistentes al ataque que las regiones cristalinas, provocando un aumento de la cristalinidad general. Posteriormente con el ataque a los cristales más pequeños situados en la fase amorfa-cristalina o producidos por el consumo inicial de la fase amorfa, éstos provocan la disminución de la cristalinidad del polímero (Maroof et al., 2021).

h. Calorimetría Diferencial de Barrido

La calorimetría diferencial de barrido (Differential scanning calorimetry, DSC) evalúa los cambios térmicos y cristalinos del polímero como indicación de su degradación por la acción microbiana (Hikmah et al., 2018). Para la realización de esta prueba las muestras son sometidas a temperaturas entre -20, 0 y 200 °C con rampas de calentamiento y enfriamiento de 10 °C/min dependiendo del investigador. A partir de la prueba se observará el corrimiento a la izquierda de los espectros de las muestras iniciales y disminución de las temperaturas de fusión, lo que sugiere el debilitamiento de los enlaces del polímero, debido al proceso biodegradativo (Quinchía y Maya, 2015).

i. Cromatografía de permeación en gel de alta temperatura

La cromatografía de permeación en gel de alta temperatura (High Temperature Gel Permeation Chromatography, HT - GPC) es un método poco utilizado en la biodegradación del LDPE que evalúa las propiedades físicas como fuerza, rigidez y resistencia química de un polímero y permite medir los cambios en el peso molecular y la distribución del polímero del polietileno (Liu et al., 2022).

j. Análisis del carbono total

A través de este método se cuantifica el carbono total de la película de LDPE haciendo uso de un analizador elemental después de la incubación con los microorganismos. Para ello se utiliza una película de LDPE sin inocular con la cual se compara el porcentaje de carbono total reducido después de realizada la biodegradación; sin embargo, se debe considerar diversos aspectos para reportar buenos resultados, entre ellos el tiempo de duración de la incubación y el grosor de la película (Maroof et al., 2021).

2.3. Definición de términos básicos

- ❖ **Eficiencia:** Capacidad de lograr los propósitos trazados, al menor costo posible y en el menor tiempo, sin malgastar recursos y con el máximo nivel de calidad factible (Ganga et al., 2016).
- ❖ **Degradación microbiana:** Capacidad que tienen bacterias y hongos para metabolizar diversos compuestos orgánicos e inorgánicos en condiciones aerobias o anaerobias (Pérez et al., 2015).
- ❖ **Polietileno de baja densidad:** Polímero sintético derivado del petróleo, caracterizado por presentar propiedades de tenacidad, ductilidad, excelente resistencia química y baja permeabilidad al vapor de agua (Ararat y Murillo, 2016).
- ❖ **Microorganismos:** Organismos microscópicos que existen como grupos unicelulares, multicelulares o celulares y están distribuidos por todas partes en la biósfera. Los microorganismos pueden afectar de manera positiva o negativa el medio ambiente en el que crecen (Madina y Amin, 2021).

III. MÉTODOS Y MATERIALES

3.1. Tipo y Diseño de investigación

La investigación fue descriptiva, básico-transversal, retrospectiva y bibliográfica, con un diseño no experimental (Hernández et al., 2014).

3.2. Población y muestra

La población estuvo constituida por todos los artículos científicos relacionados a la eficiencia de los microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) publicados en las bases de datos Scopus, Web of Science (WOS) y Embase y la muestra no probabilística y por conveniencia correspondió a los artículos publicados en América y Asia durante el periodo 2010 - 2022.

❖ Criterios de inclusión

Los criterios de inclusión fueron: Bacterias, hongos y consorcios microbianos reportados como degradadores de LDPE en investigaciones experimentales; artículos experimentales que reportaron como mínimo el porcentaje de pérdida de peso del LDPE; artículos publicados en países de América y Asia durante el periodo enero 2010 a octubre 2022 y publicaciones en español e inglés con acceso libre.

❖ Criterios de exclusión

Los criterios de exclusión fueron: Bacterias, hongos y consorcios microbianos reportados como degradadores de LDPE en investigaciones de tipo revisión sistemática; degradación microbiana de plásticos diferentes al LDPE y artículos científicos que no utilicen la gravimetría como método mínimo de estudio.

3.3. Método, técnica, instrumentos y procedimiento

3.3.1. Método: Método cualitativo

3.3.2. Técnica: Técnica cualitativa de tipo observacional (Alvitres, 2000).

3.3.3. Instrumento

Los instrumentos correspondieron a las bases de datos (Scopus, WOS, Embase) y fuentes secundarias (artículos científicos). Asimismo, se utilizó una computadora con conexión a internet,

el navegador web Google Chrome y Microsoft office 2016, para la búsqueda, selección, análisis, procesamiento, redacción y almacenamiento de la información.

3.4. Procedimiento

a. Revisión sistemática de los artículos científicos sobre la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) publicados en América y Asia, 2010 - 2022

En las bases de datos Scopus, Web of Science (WOS) y Embase se realizó la búsqueda con las palabras clave: biodegradation AND low density polyethylene, limitada al período 2010 - 2022, países de América y Asia, tipo de documento “artículo”, idioma y artículos de acceso libre. De esta manera, se estableció el protocolo de búsqueda mediante las palabras clave y operadores booleanos (AND, OR, OR NOT). El protocolo de búsqueda en Embase solo permitió delimitar idioma, tiempo y tipo de documento y el resto se clasificó de manera manual.

❖ Protocolo de búsqueda Scopus

((TITLE-ABS-KEY(BIODEGRADATION) AND TITLE-ABS-KEY(LOW DENSITY POLYETHYLENE)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE,"Spanish")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR,2010) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2022)) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Article")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar")) AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"India") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Indonesia") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Brazil") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Malaysia") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Canada") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Bangladesh") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Iran") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"China") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"United States") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Singapore") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Hong Kong")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE,"final")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE,"j"))))

❖ Protocolo de búsqueda WOS

(ALL=(biodegradation)) AND ALL=(low density polyethylene) and 2022 or 2021 or 2020 or 2019 or 2018 or 2017 or 2016 or 2015 or 2014 or 2013 or 2012 or 2011 (Publication Years) and

Article (Document Types) and Article (Document Types) and All Open Access (Open Access) and English (Languages) and INDIA or BRAZIL or IRAN or MEXICO or PEOPLES R CHINA or USA or PAKISTAN or CANADA or COLOMBIA or SOUTH KOREA or ECUADOR or INDONESIA or IRAQ or SRI LANKA or COSTA RICA or EGYPT or IRELAND or MALAYSIA or TAIWAN or QATAR or PERU or CHILE or THAILAND or JAPAN or NETHERLANDS or SAUDI ARABIA or VIETNAM or ISRAEL (Countries/Regions)

❖ **Protocolo de búsqueda Embase**

“biodegradation AND polyethylene AND low AND density AND [2010-2022]/py AND [article]/lim AND ([english]/lim OR [spanish]/lim”

A continuación, los artículos científicos filtrados de WOS y Scopus se exportaron con el formato CSV (valores separados por comas) para luego filtrar los datos de interés en dos hojas de Excel. En el caso de la base de datos de Embase, la información obtenida a través del protocolo de búsqueda no se logró descargar directamente, pero sí se envió vía correo electrónico (76914729@pronabec.edu.pe) y se hizo una clasificación manual de los artículos en Excel siguiendo el formato de las dos bases de datos anteriores. Finalmente, los datos de las tres hojas de Excel se integraron en una sola para continuar con el análisis PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), para lo cual se eliminaron los duplicados, se estableció la pertinencia considerando el título y el resumen y se determinó la accesibilidad del documento, información que se resumió en el diagrama de flujo PRISMA 2020 para Revisiones Sistemáticas (Page et al., 2021).

b. Comparación de los métodos utilizados para detectar y cuantificar la degradación microbiana de polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010 - 2022

Se realizó la identificación, descripción y comparación de los métodos de detección y cuantificación de la biodegradación del LDPE obtenidos de los artículos científicos, considerando el lugar y año de publicación. Los métodos de detección correspondieron a los cambios físicos, estructurales y formación de productos intermediarios del polímero. En la cuantificación se analizó la pérdida de peso del plástico, porcentaje de ruptura de la cadena polimérica y el dióxido de carbono producido.

c. Diferenciación de las características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos degradadores de LDPE

Se realizó la selección y agrupamiento de las especies de microorganismos degradadores de LDPE y se les clasificó según su taxonomía mediante el buscador de taxonomía (Taxonomy Browser) del Centro Nacional de Información Biotecnológica (National Center for Biotechnology Information, NCBI). Las características morfológicas fueron clasificadas según el microorganismo (hongo y bacteria). En el caso de las bacterias se consideró su forma (bacilos, cocos, filamentos) y la tinción de Gram (positiva y negativa) y los hongos se clasificaron como levaduras y mohos.

d. Comparación de la eficiencia de los microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) reportados identificados en América y Asia, 2010 - 2022

Se realizó la identificación y selección de artículos científicos, se registraron las especies de microorganismos degradadores de LDPE y se comparó la eficiencia en la degradación del LDPE.

3.5. Aspectos éticos

En la investigación de tipo bibliográfica la información se obtuvo mediante el internet. Se seleccionaron artículos científicos en los que se reportó la eficiencia de los microorganismos en la degradación del LDPE en América y Asia 2010 - 2020. No se consideró el uso del consentimiento informado ni se solicitaron autorizaciones correspondientes con el compromiso de utilizar de manera responsable y veraz los artículos científicos obtenidos de las bases de datos de Scopus, WOS, Embase y otras incluidas en la investigación.

3.6. Procesamiento y análisis de datos

La información obtenida de la eficiencia de los microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad reportados durante 2010 - 2022 en América y Asia, se organizó en tablas y figuras con el programa Microsoft Office 2016.

IV. RESULTADOS

4.1. Revisión sistemática de las bases de datos Scopus, Web of Science y Embase sobre las publicaciones de microorganismos degradadores de LDPE identificados en América y Asia, 2010 - 2022

El protocolo de búsqueda permitió identificar 96 artículos científicos en la base de datos Scopus, 95 en WOS y 127 en Embase. Se eliminaron 88 duplicados, 164 por título, 5 por resumen y 20 por ausencia del método gravimetría. De los 41 artículos pertinentes, 30 fueron obtenidos en texto completo y 15 se incluyeron de estudios previos. En total se analizaron y sintetizaron 45 documentos, los cuales se presentan en el formato PRISMA con cada una de las etapas del proceso de revisión sistemática (Figura 1).

4.2. Comparación de los métodos utilizados para detectar y cuantificar la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) identificados en América y Asia, 2010 - 2022

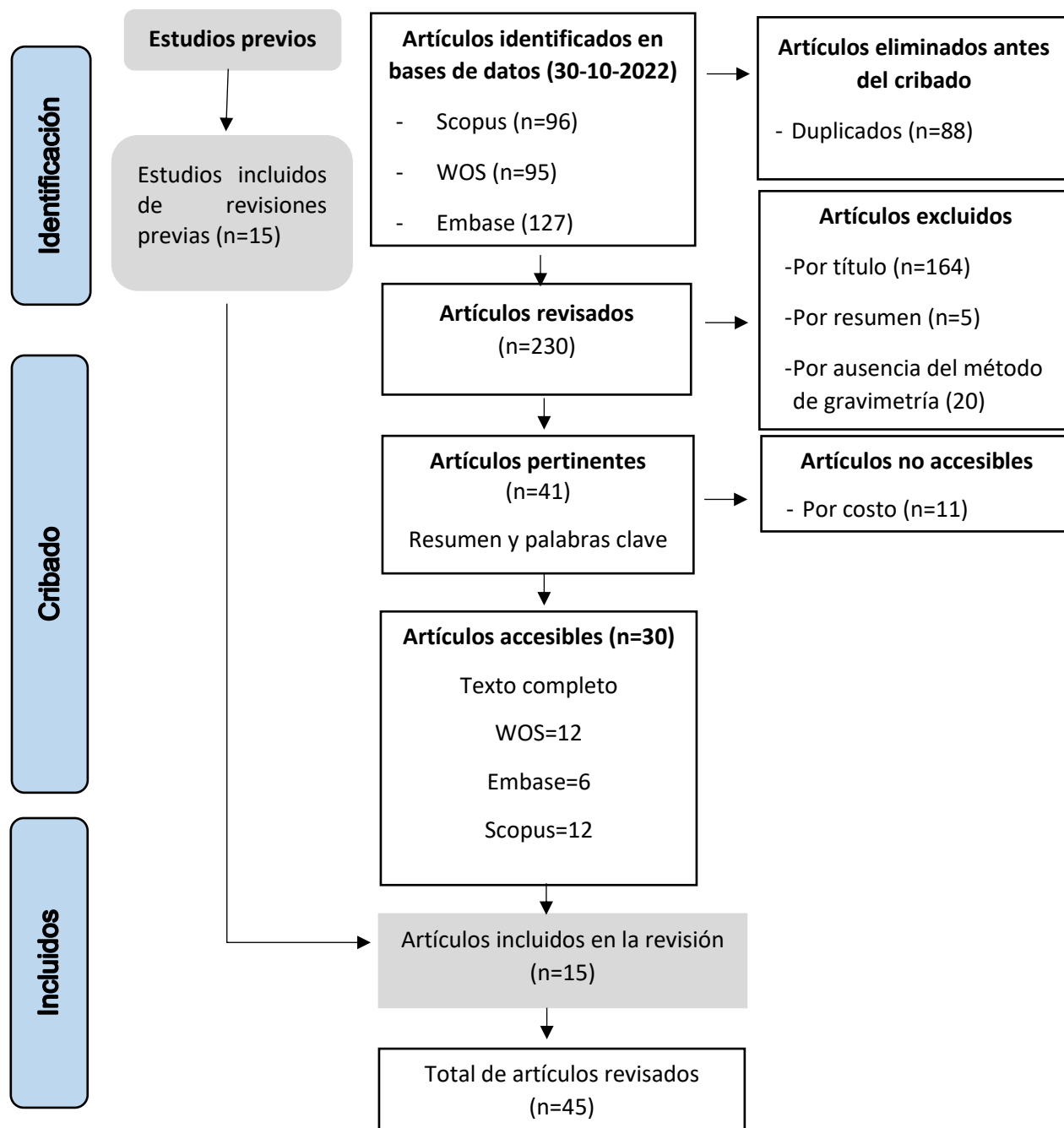
Los métodos más utilizados para la detección de la degradación del LDPE en las publicaciones de América y Asia, 2010 - 2022 fueron microscopía electrónica de barrido, SEM (68, 88 %) y espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier, FTIR (68, 88 %). También se utilizaron microscopía de fuerza atómica, AFM (22, 22 %) y otros como microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FE-SEM), cromatografía de gases/espectrometría de masas (GC-MS), FTIR con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR), microscopía de fluorescencia, espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN), cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID) y microscopía óptica (Tabla 1). El método más utilizado para la cuantificación de la degradación del LDPE fue la gravimetría o pesaje (100, 00 %). También se utilizaron las pruebas de resistencia a la tracción (22, 22 %), prueba de STURM (13, 33 %), la prueba de adhesión bacteriana a hidrocarburos, BATH (13, 33%), espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS), análisis termogravimétrico (TGA), análisis de difracción de rayos X (XDR), calorimetría diferencial de barrido (DSC), cromatografía de permeación en gel de alta temperatura (HT-GPC) y análisis de carbono (Tabla 1).

En las publicaciones de América, 2010 - 2022, los métodos para detectar y cuantificar el LDPE fueron la gravimetría (100 %), FTIR (50 %), SEM (50 %), microscopía óptica (17 %), DSC (17 %), microscopía de fluorescencia (17 %) y GC - FID con 17 % (Figura 2). En las publicaciones de Asia, 2010 - 2022, los métodos fueron la gravimetría (100 %), SEM (72 %), FTIR (69 %), AFM (31 %), resistencia a la tracción (26 %), STURM (15 %), BATH (15 %), FE - SEM (13 %),

microscopía óptica y GC - MS (10 %) y otros métodos con menos de 8 % (Figura 3).

Figura 1

Proceso de selección de artículos para la revisión sistemática de literatura con el enfoque PRISMA.*



* Formato tomado de Page et al. (2021)

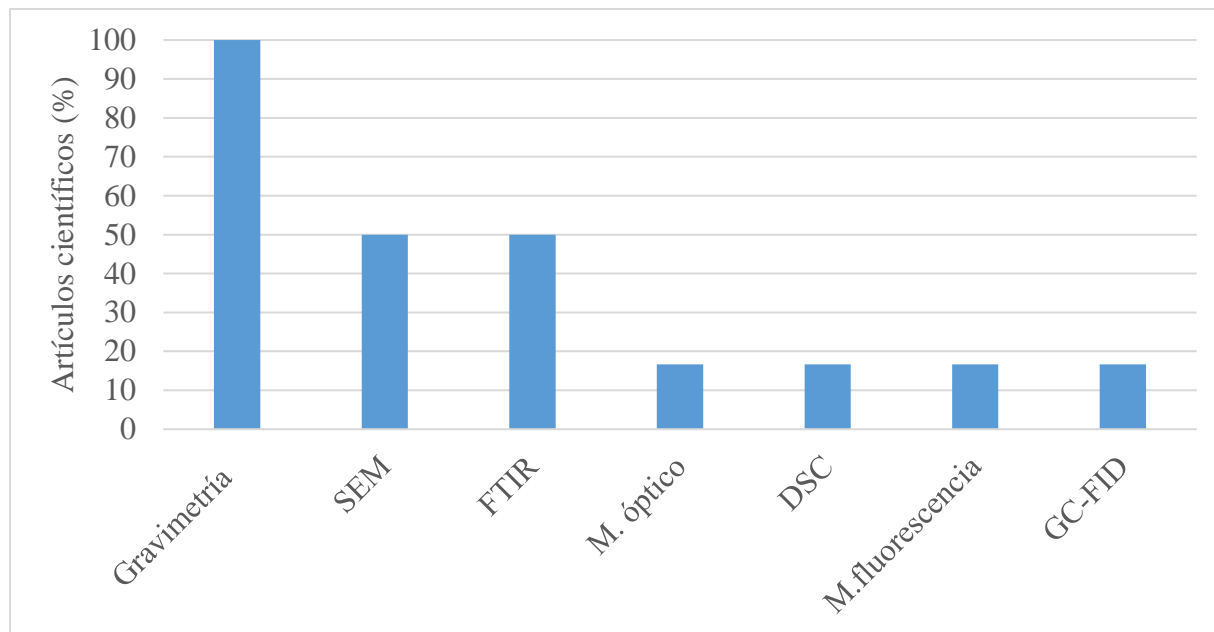
Tabla 1

Frecuencia de métodos utilizados para la detección y cuantificación de la degradación del LDPE, en publicaciones de América y Asia, 2010 - 2022

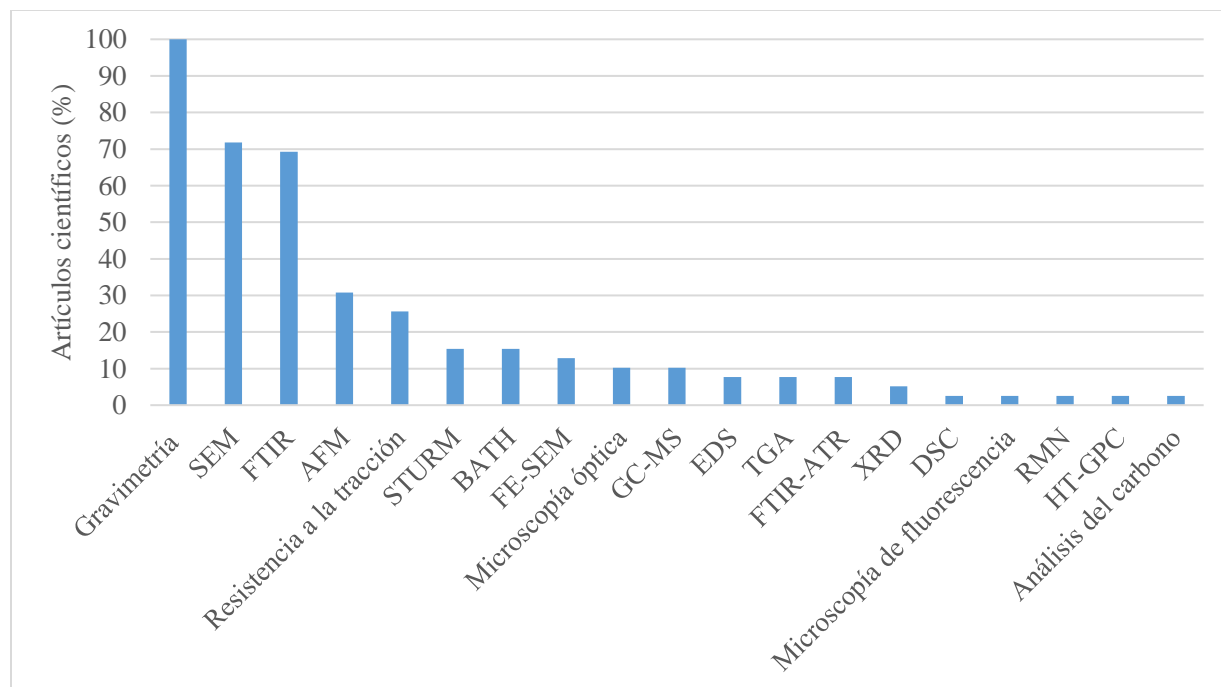
Métodos		Artículos científicos	
		Nº	(%)
Microscopía electrónica de barrido (SEM)	Detección	31	68, 88
Espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR)	Detección	31	68, 88
Microscopía de fuerza atómica (AFM)	Detección	10	22, 22
Microscopía electrónica de emisión de campo (FE - SEM)	Detección	5	11, 11
Microscopía óptica	Detección	6	13, 33
Cromatografía de Gases/Espectrometría de masas (GC - MS)	Detección	4	8, 88
Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR - ATR)	Detección	2	4, 44
Microscopía de fluorescencia	Detección	2	4, 44
Cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC - FID)	Detección	2	4, 44
Espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN)	Detección	1	2, 22
Gravimetría	Cuantificación	45	100, 00
Resistencia a la tracción	Cuantificación	10	22, 22
Prueba de STURM	Cuantificación	6	13, 33
Prueba de adhesión bacteriana a hidrocarburos (BATH)	Cuantificación	6	13, 33
Espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS)	Cuantificación	3	6, 66
Análisis termogravimétrico (TGA)	Cuantificación	3	6, 66
Análisis de difracción de rayos X (XRD)	Cuantificación	2	4, 44
Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	Cuantificación	2	4, 44
Cromatografía de permeación en gel de alta temperatura (HT - GPC)	Cuantificación	1	2, 22
Análisis de carbono	Cuantificación	1	2, 22

Figura 2

Frecuencia de los métodos utilizados para la detección y cuantificación de la degradación microbiana del LDPE en las publicaciones de América 2010 - 2022.

**Figura 3**

Frecuencia de los métodos utilizados para la detección y cuantificación de la degradación microbiana del LDPE en las publicaciones de Asia 2010 - 2022.



4.3. Diferenciación de las características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos degradadores de LDPE identificados en América y Asia, 2010 – 2022

Los microorganismos degradadores del LDPE identificados en América y Asia, 2010 - 2022 correspondieron a los reinos Bacteria en el 62 % y Fungi en el 38 % de las publicaciones (Tablas 2, 3, figura 4). Los microorganismos del reino Bacteria se identificaron en el phylum Actinomycetota, Fusobacteriota, Bacillota, Firmicutes y Proteobacteria. En el phylum Actinomycetota se identificaron especies de las clases Actinomycetes con las familias Nocardiaceae (*Nocardia* spp. *Rhodococcus* spp.) y Streptomycetaceae (*Streptomyces* spp.).

En el phylum Fusobacteriota se identificaron especies de la clase Fusobacteriia (*Streptobacillus* sp.). En el phylum Bacillota se identificaron especies de la clase Bacilli, orden Bacillales y la familia Bacillaceae (*Exiguobacterium* sp. y *Lysinibacillus* spp.). En el phylum Firmicutes se reportaron especies de las clases Bacilli con las familias Bacillaceae (*Bacillus* spp.), Paenibacillaceae (*Paenibacillus* sp.) y Streptococcaceae (*Streptococcus* sp.), así como la clase Clostridia con la familia Clostridiaceae (*Clostridium* sp.). En el phylum Proteobacteria se identificaron especies de las clases Betaproteobacteria con las familias Alcaligenaceae (*Achromobacter* sp., *A. denitrificans*), Burkholderiaceae (*Cupriavidus necator*) y Thiobacillaceae (*Thiobacillus* sp.). En el phylum Proteobacteria también se registraron especies de la clase Gammaproteobacteria con las familias Moraxellaceae (*Acinetobacter iwoffii*), Pseudomonadaceae (*Pseudomonas* spp.), Xanthomonadaceae (*Stenotrophomonas* sp.), Enterobacteriaceae (*Enterobacter cloacae*, *Escherichia coli*, *Enterobacter* spp., *Klebsiella*) Erwiniaceae (*Pantoea* sp.), Morganellaceae (*Proteus* spp.), Yersiniaceae (*Serratia* sp.), Halomonadaceae (*Halomonas* sp. *Cobetia* sp.) y Alcanivoracaceae (*Alcanivorax* sp.).

Tabla 2

Características taxonómicas de bacterias degradadoras del LDPE en América y Asia, 2010 - 2022*

Reino	Phylum	Clase	Orden	Familia	Género y especie
Bacteria	Actinomycetota	Actinomycetes	Mycobacteriales	Nocardiaceae	<i>Nocardia</i> sp., <i>N. farcinica</i> <i>Rhodococcus</i> sp., <i>R. ruber</i>
Bacteria	Actinomycetota	Actinomycetes	Streptomycetales	Streptomycetaceae	<i>Streptomyces</i> sp., <i>S. alborgiseolus</i> <i>S. gancidicus</i> , <i>S. coelicoflavus</i>
Bacteria	Fusobacteriota	Fusobacteriia	Fusobacteriales	Leptotrichiaceae	<i>Streptobacillus</i> sp.
Bacteria	Bacillota	Bacilli	Bacillales	Bacillaceae	<i>Exiguobacterium</i> sp. <i>Lysinibacillus</i> sp., <i>L. fusiformis</i>
Bacteria	Firmicutes	Bacilli	Bacillales	Bacillaceae	<i>Bacillus</i> sp., <i>B. wiedmannii</i> , <i>B. amyloliquefaciens</i> , <i>B. cereus</i> , <i>B. safensis</i> , <i>B. siamensis</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>B. tropicus</i> , <i>B. velezensis</i>
Bacteria	Firmicutes	Bacilli	Bacillales	Paenibacillaceae	<i>Paenibacillus</i> sp.
Bacteria	Firmicutes	Bacilli	Lactobacillales	Streptococcaceae	<i>Streptococcus</i> sp.
Bacteria	Firmicutes	Clostridia	Eubacteriales	Clostridiaceae	<i>Clostridium</i> sp.
Bacteria	Proteobacteria	Beta protobacteria	Burkholderiales	Alcaligenaceae	<i>Achromobacter</i> sp., <i>A. denitrificans</i>
Bacteria	Proteobacteria	Betaproteobacteria	Burkholderiales	Burkholderiaceae	<i>Cupriavidus necátor</i>
Bacteria	Proteobacteria	Betaproteobacteria	Nitrosomonadales	Thiobacillaceae	<i>Thiobacillus</i> sp.
Bacteria	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Moraxellales	Moraxellaceae	<i>Acinetobacter iwoffii</i>
Bacteria	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Pseudomonadales	Pseudomonadaceae	<i>Pseudomonas</i> sp., <i>P. aeruginosa</i> , <i>P. putida</i> , <i>P. syringae</i> , <i>P. citronellolis</i> .
Bacteria	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Xanthomonadales	Xanthomonadaceae	<i>Stenotrophomonas</i> sp.
Bacteria	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	<i>Enterobacter</i> sp., <i>E. cloacae</i> <i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella</i> sp.
Bacteria	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Erwiniaceae	<i>Pantoea</i> sp.
Bacteria	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Morganellaceae	<i>Proteus</i> spp.
Bacteria	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Yersiniaceae	<i>Serratia</i> sp.
Bacteria	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Oceanospirillales	Halomonadaceae	<i>Halomonas</i> sp., <i>Cobetia</i> sp.
Bacteria	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Oceanospirillales	Alcanivoracaceae	<i>Alcanivorax</i> sp.

* Datos tomados de la plataforma de National Center for Biotechnology Information, NCBI

Tabla 3

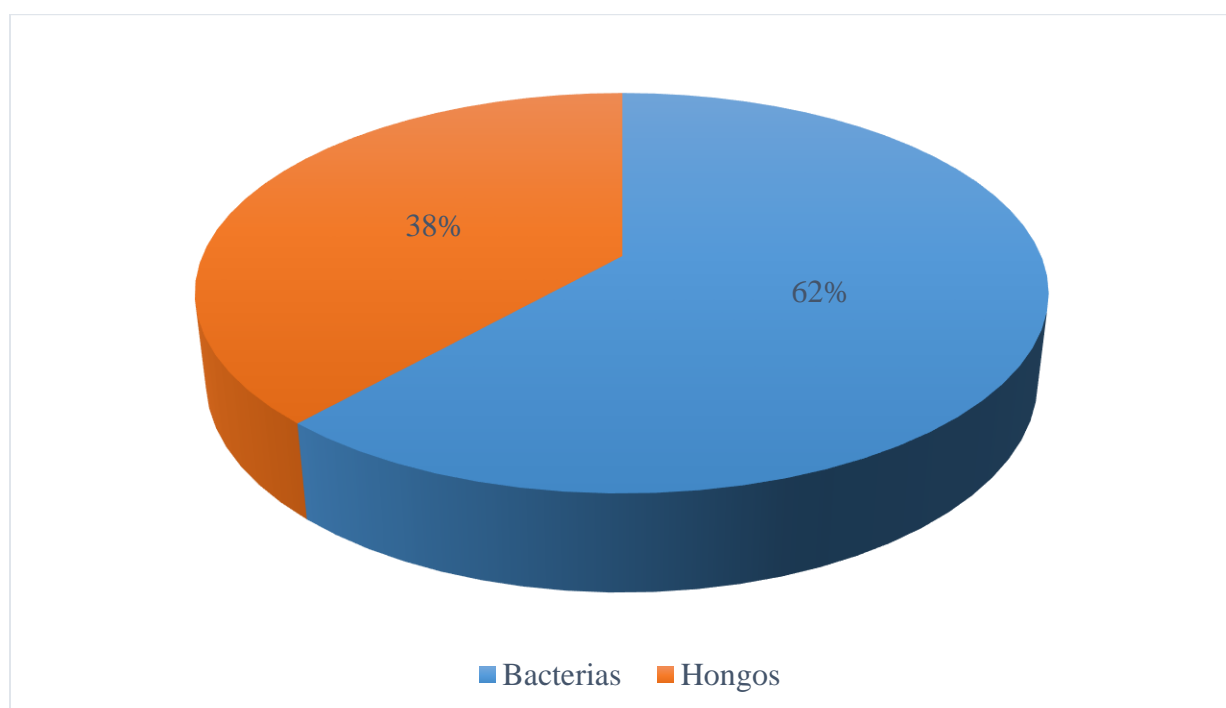
Características taxonómicas de hongos degradadoras del LDPE en América y Asia, 2010 - 2022*

Reino	Phylum	Subphylum	Clase	Subclase	Orden	Sub-orden	Familia	Género y especie
Fungi	Ascomycota	Pezizomycotina	Dothideomycetes	Pleosporomycetidae	Pleosporales	Pleosporineae	Didymellaceae	<i>Stagonosporopsis citrulli</i>
Fungi	Ascomycota	Pezizomycotina	Dothideomycetes		Capnodiales		Mycosphaerellaceae	<i>Thyrostroma jaczewskii</i>
Fungi	Ascomycota	Pezizomycotina	Eurotiomycetes	Eurotiomycetidae	Eurotiales		Aspergillaceae	<i>Aspergillus</i> sp., <i>A. nonius</i> , <i>A. versicolor</i> , <i>Penicillium</i> sp., <i>P. oxalicum</i> , <i>P. chrysogenum</i>
Fungi	Ascomycota	Pezizomycotina	Sordariomycetes	Hypocreomycetidae	Glomerellales		Glomerellaceae	<i>Colletotrichum fruticola</i>
Fungi	Ascomycota	Pezizomycotina	Sordariomycetes	Sordariomycetidae	Diaporthales		Diaporthaceae	<i>Diaportha italiana</i>
Fungi	Ascomycota	Pezizomycotina	Sordariomycetes	Hypocreomycetidae	Hypocreales		Nectriaceae	<i>Fusarium</i> sp.
Fungi	Ascomycota	Pezizomycotina	Sordariomycetes	Xylariomycetidae	Xylariales		Sporocadaceae	<i>Neopestalotiopsis phangngaensis</i>
Fungi	Ascomycota	Pezizomycotina	Sordariomycetes	Hypocreomycetidae	Hypocreales		Hypocreaceae	<i>Trichoderma</i> spp.
Fungi	Ascomycota	Saccharomycotina	Saccharomycetes		Saccharomycetales		Saccharomycetaceae	<i>Saccharomyces</i> sp.
Fungi	Ascomycota		Eurotiomycetes		Eurotiales		Trichocomaceae	<i>Thermomyces lanuginosus</i>
Fungi	Basidiomycota	Agaricomycotina	Tremellomycetes		Trichosporonales		Trichosporonaceae	<i>Hyalodendron</i> sp.
Fungi	Basidiomycota	Agaricomycotina	Agaricomycetes		Polyporales		Polyporaceae	<i>Pycnoporus sanguineus</i>
Fungi	Basidiomycota	Pucciniomycotina	Microbotryomycetes		Sporidiobolales		Sporidiobolaceae	<i>Rhodotorula</i> sp.
Fungi	Basidiomycota		Basidiomycetes		Polyporales		Phanerochaetaceae	<i>Phlebiopsis flavidoalba</i>
Fungi	Basidiomycota		Agaricomycetes	Aphyllorphomycetidae	Agaricales		Schizophyllaceae	<i>Schizophyllum commune</i>
Fungi	Basidiomycota		Agaricomycetes		Polyporales		Phanerochaetaceae	<i>Phanerodontia chrysosporium</i>
Fungi	Mucoromycota	Mucoromycotina	Mucoromycetes		Mucorales	Mucorineae	Rhizopodaceae	<i>Rhizopus oryzae</i>

* Datos tomados de la plataforma de National Center for Biotechnology Information, NCBI

Figura 4

Frecuencia de los microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) reportados en América y Asia, 2010 - 2022.

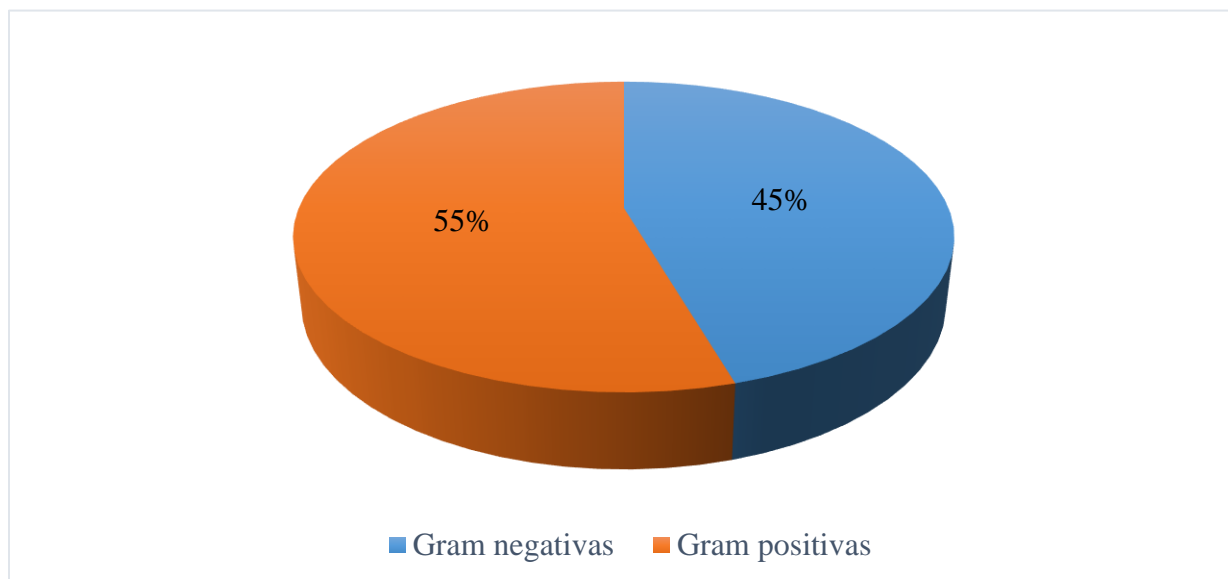


Los microorganismos del reino Fungi se identificaron en los phylum Ascomycota, Basidiomycota y Mucoromycota. En el phylum Ascomycota se identificaron especies de las familias Didymellaceae (*Stagonosporopsis citrulli*), Mycosphaerellaceae (*Thyrostroma jaczewskii*), Aspergillaceae (*Aspergillus* spp., *Penicillium* spp.), Glomerellaceae (*Colletotrichum fructicola*), Diaporthaceae (*Diaporthe italiana*), Nectriaceae (*Fusarium* sp.), Sporocadaceae (*Neopestalotiopsis phangngaensis*), Hypocreaceae (*Trichoderma* spp.), Saccharomycetaceae (*Saccharomyces* sp.) y Trichocomaceae (*Thermomyces lanuginosus*). En el phylum Basidiomycota se identificaron especies de las familias Trichosporonaceae (*Hyalodendron* sp.), Polyporaceae (*Pycnoporus sanguineus*), Sporidiobolaceae (*Rhodotorula* sp.), Phanerochaetaceae (*Phlebiopsis flavidoalba*), Schizophyllaceae (*Schizophyllum commune*) y Phanerochaetaceae (*Phanerodontia chrysosporium*). En el phylum Mucoromycota se identificó una especie de la familia Rhizopodaceae (*Rhizopus oryzae*).

Las bacterias reportadas como degradadoras del LDPE en América y Asia, 2010 - 2022 fueron Gram positivas (55 %) y Gram negativas en el 45 % de las publicaciones (Figura 5), según su morfología predominaron los bacilos (72 %) seguido de los filamentos y cocos en el 23 y 5 % de publicaciones, respectivamente (Figura 6). El género *Pseudomonas* (33, 33 %) fue el predominante entre las bacterias reportadas como degradadoras del LDPE, seguido de los géneros *Bacillus* (20 %) y *Streptomyces* con 8, 89 % (Tabla 4). Respecto a los hongos reportados como degradadores de LDPE en América y Asia, 2010 - 2022, predominaron los mohos en el 94 % de publicaciones (Figura 7). El género *Aspergillus* (26, 67 %) fue el predominante entre los hongos reportados como degradadores del LDPE, seguido del género *Penicillium* (6, 67 %), *Fusarium* (4, 44 %), *Neopestalotiopsis* (4, 44 %) y *Trichoderma* con 4, 44 % (Tabla 4).

Figura 5

Frecuencia de bacterias Gram positivas y Gram negativas degradadoras de polietileno de baja densidad (LDPE), reportadas en América y Asia, 2010 - 2022.

**Figura 6**

Frecuencia de bacilos, cocos y filamentos bacterianos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE), reportados en América y Asia, 2010 - 2022.

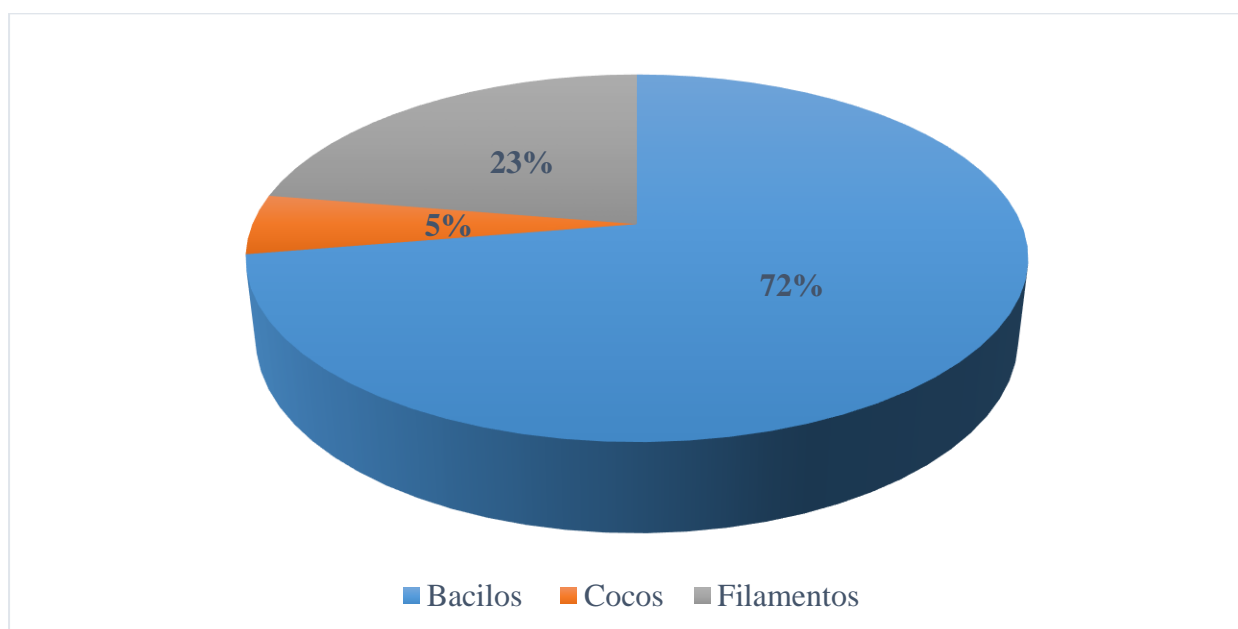


Figura 7

Frecuencia de levaduras y mohos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE), reportados en América y Asia, 2010 - 2022.

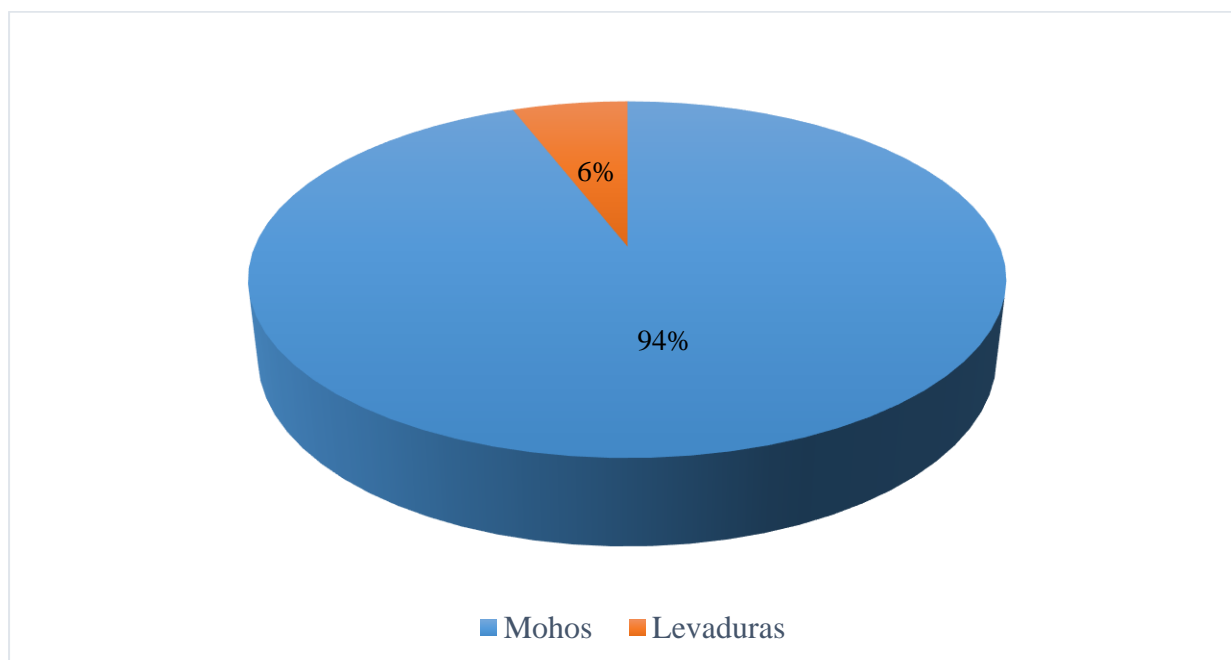


Tabla 4

Frecuencia de los géneros de bacterias y hongos degradadores de polietileno de baja densidad (LDPE) reportados en América y Asia, 2010 - 2022

Microorganismos	Género	Nº	Artículos científicos (%)
Bacteria	<i>Pseudomonas</i>	15	33, 33
Bacteria	<i>Bacillus</i>	9	20, 00
Bacteria	<i>Streptomyces</i>	4	8, 89
Bacteria	<i>Enterobacter</i>	3	6, 67
Bacteria	<i>Stenotrophomonas</i>	3	6, 67
Bacteria	<i>Paenibacillus</i>	2	4, 44
Bacteria	<i>Streptococcus</i>	2	4, 44
Bacteria	<i>Achromobacter</i>	2	4, 44
Bacteria	<i>Acinetobacter</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Alcanivorax</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Clostridium</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Cobetia</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Cupriavidus</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Escherichia</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Exiguobacterium</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Halomonas</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Klebsiella</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Lysinibacillus</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Mycrobacterium</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Nocardia</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Pantoea</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Proteus</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Rhodococcus</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Serratia</i>	1	2, 22
Bacteria	<i>Thiobacillus</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Aspergillus</i>	12	26, 67
Hongo	<i>Penicillium</i>	3	6, 67
Hongo	<i>Fusarium</i>	2	4, 44
Hongo	<i>Neopestalotiopsis</i>	2	4, 44
Hongo	<i>Trichoderma</i>	2	4, 44
Hongo	<i>Colletotrichum</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Diaporthe</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Hyalodendron</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Phanerodontia</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Phlebiopsis</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Pycnoporus</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Rhizopus</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Rhodotorula</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Saccharomyces</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Schizophyllum</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Stagonosporopsis</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Thermomyces</i>	1	2, 22
Hongo	<i>Thyrostroma</i>	1	2, 22

4.4. Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) por microorganismos identificadas en América y Asia, 2010 - 2022

La eficiencia en la degradación expresada como pérdida de peso del LDPE por actividad de bacterias identificadas en América y Asia, 2010 - 2022 presentó un rango de 0, 16 - 70, 00 % durante 18 - 150 días (Tabla 5), la eficiencia de los hongos un rango de 0, 35 - 54, 34 % durante 30 - 270 días (Tabla 6), la eficiencia de los consorcios microbianos un rango de 4, 80 - 81, 00 % durante 18 - 160 días (Tabla 7).

En América la eficiencia en la degradación bacteriana del LDPE fue de 8, 20 – 30, 80 % en un periodo de 18 - 90 días, siendo mayor con *Paenibacillus* sp. (30, 80 %). Respecto a degradación fúngica fue 0, 66 - 35, 30 % en 77 - 180 días, siendo mayor con *Aspergillus niger* (35, 30 %). En cuanto a los consorcios microbianos la eficiencia en la degradación del LDPE fue 4, 80 - 13, 50 % durante 18 - 60 días, siendo mayor con el consorcio de *C. necator* H16, *P. putida* (LS46, IRN22) con 13, 50 % en 18 días (Tabla 8). En Asia la eficiencia en la degradación bacteriana del LDPE fue de 0, 76 - 64, 00 % en un periodo de 4 - 150 días siendo mayor con *Pantoea* sp. (64, 00 %), *Pseudomonas* sp. (61, 00), *Proteus* sp. (59, 00 %) *Escherichia coli* (45, 00 %), *Bacillus* sp. (40, 00 %) y *Streptomyces* sp. (40, 00 %) en 120 días y *Serratia* sp. (40, 00 %) en 150 días (Tabla 9).

Respecto a degradación fúngica fue 0, 35 - 72, 00 % en 30-120 días, siendo mayor con *Neopestalotiopsis phangngaensis* (54, 34 %), *Aspergillus niger* (72, 00 %), *Colletotrichum fructicola* (48, 78 %), *Saccharomyces* sp. (43, 00 %), *Diaporthe italiana* (43, 90 %), *Thyrostroma jaczewskii* (46, 34 %), *Aspergillus oryzae* (40, 00 %) y *Aspergillus versicolor* (40, 60 %), durante 30 - 120 días (Tabla 10). En cuanto los consorcios microbianos la eficiencia en la degradación del LDPE fue 5, 30 - 81, 00 % en 30 - 160 días, siendo mayor en el de *Enterobacter* spp. y *Pantoea* sp. (81, 00 %) durante 120 días (Tabla 11).

Tabla 5

Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de bacterias identificadas en América y Asia, 2010 - 2022

Bacterias	Días	Pérdida de peso (%)
<i>Achromobacter</i> spp.	60 -100	7, 45- 12, 3
<i>Acinetobacter iwoffii</i>	90	0, 76
<i>Alcanivorax</i> sp. H265	90	0, 97
<i>Bacillus</i> spp.	30 - 120	1, 50 - 40, 00
<i>Cobetia</i> sp. H237	90	1, 40
<i>Enterobacter</i> spp.	45 - 120	9, 00 -70, 00
<i>Escherichia coli</i>	30	45, 00
<i>Exiguobacterium</i> sp. H256	90	1, 26
<i>Halomonas</i> sp. H-255	90	1, 72
<i>Klebsiella</i>	30	21, 00
<i>Lysinibacillus fusiformis</i>	18	8, 20
<i>Nocardia</i> spp.	60	3, 60 - 5, 98
<i>Paenibacillus</i> sp.	90 - 120	11, 60 - 30, 80
<i>Pantoea</i> spp.	120	24, 00 - 64 ,00
<i>Proteus</i> spp.	120	16, 00 - 59, 00
<i>Pseudomonas</i> spp.	4 - 150	1, 15 - 61, 00
<i>Rhodococcus</i> spp.	60	3, 01 - 6, 23
<i>Serratia</i> sp.	150	40, 00
<i>Stenotrophomonas</i> spp.	100 - 150	7, 54 - 32, 00
<i>Streptococcus</i> spp.	30	0, 16
<i>Streptomyces</i> spp.	28 - 90	2, 31 - 40, 00

Tabla 6

Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de hongos identificados en América y Asia, 2010-2022

Hongos	Días	Pérdida de peso (%)
<i>Aspergillus</i> spp.	30 - 270	4, 90 - 40, 60
<i>Colletotrichum fructicola</i>	90	48, 78
<i>Diaporthe italiana</i>	90	43, 90
<i>Fusarium</i> spp.	60 - 90	0, 59 - 9, 00
<i>Neopestalotiopsis phangngaensis</i>	90	54, 34
<i>Penicillium chrysogenum</i> NS10 (KU559907)	90	0, 35 - 36, 60
<i>Phanerodontia chrysosporium</i>	60	2, 50
<i>Phlebiopsis flavidoalba</i>	60	2, 60
<i>Pycnoporus sanguineus</i> UTCH03	180	0, 66
<i>Rhizopus oryzae</i>	30	8, 40
<i>Saccharomyces</i>	30	43, 00
<i>Schizophyllum commune</i>	60	9, 65
<i>Stagonosporopsis citrulli</i>	90	45, 12
<i>Thermomyces lanuginosus</i>	30	9, 21
<i>Thyrostroma jaczewskii</i>	90	46, 34
<i>Trichoderma</i> spp.	35 - 45	4, 87 - 7, 51

Tabla 7

Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de consorcios microbianos identificados en América y Asia, 2010-2022

Consortios microbianos	Días	Pérdida de peso (%)
<i>Cupriavidus necator</i> H16, <i>P. putida</i> (LS46, IRN22)	18	13, 50
<i>Enterobacter</i> sp.nov. bt DSCE01, <i>E. cloacae</i> nov. bt DSCE02, <i>P. aeruginosa</i> nov. bt. DSCE-CD03	160	64, 25
<i>Enterobacter</i> spp., <i>Pantoea</i> sp.	120	38, 00 - 81, 00
<i>P. protegens</i> , <i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>B. vallismortis</i> , <i>Paenibacillus</i> sp.	120	55, 00 - 75, 00
<i>Pseudomonas</i> spp. (MP3a, MP3b)	60	5, 40
<i>Thiobacillus</i> sp. K29, <i>Clostridium</i> sp.	30	5, 30 - 6, 40
<i>Penicillium</i> sp., <i>Rhodotorula</i> sp., <i>Hyalodendron</i> sp.	60	4, 80
<i>Lysinibacillus xylanilyticus</i> , <i>A. niger</i>	126	15, 80 - 29, 50
<i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> , <i>A. oryzae</i>	55	26, 15

Tabla 8

Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de los microorganismos identificados en América, 2010 - 2022

Microorganismo	Especie	Días	Pérdida de peso (%)
Bacterias	<i>Lysinibacillus fusiformis</i>	18	8, 20
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	30	27, 30
	<i>Paenibacillus</i> sp.	90	11, 60 - 30, 80
Hongos	<i>Pycnoporus sanguineus</i> UTCH03	180	0, 66
	<i>Aspergillus terreus</i>	77	22, 14
	<i>Aspergillus niger</i>	77	35, 30
Consortios microbianos	<i>Pseudomonas</i> spp. (MP3a, MP3b)	60	5, 40
	<i>Penicillium</i> sp., <i>Rhodotorula</i> sp., <i>Hyalodendron</i> sp.	60	4, 80
	<i>C. necator</i> H16, <i>P. putida</i> (LS46, IRN22)	18	13, 50

Tabla 9

Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de bacterias identificadas en Asia, 2010 - 2022

Bacterias	Días	Pérdida de peso (%)
<i>Achromobacter</i> sp. DF22	100	7, 54
<i>Achromobacter denitrificans</i> Ebl13	60	12, 3
<i>Acinetobacter iwoff</i>	90	0, 76
<i>Alcanivorax</i> sp.	90	0, 97
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	30	18, 00
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> (BSM-1)	60	11, 00
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> (BSM-2)	60	16, 00
<i>Bacillus cereus</i>	90	6, 33
<i>Bacillus safensis</i>	30	18, 6
<i>Bacillus siamensis</i>	90	8, 46
<i>Bacillus</i> sp.	120	40, 00
<i>Bacillus</i> sp. ISJ55	60	1, 50
<i>Bacillus subtilis</i>	90	3, 75
<i>Bacillus tropicus</i> MK318648	40	10, 15
<i>Bacillus velezensis</i> C5	90	8, 01
<i>Bacillus wiedmannii</i>	90	5, 39
<i>Cobetia</i> sp.	90	1, 40
<i>Enterobacter cloacae</i> AKS7	45	9, 00
<i>Escherichia coli</i>	120	45, 00
<i>Exiguobacterium</i> sp.	90	1, 26
<i>Halomonas</i> sp.	90	1, 72
<i>Klebsiella</i> sp.	120	21, 00
<i>Nocardia farcinica</i> IR-SGS-T8 (MK719892.1)	60	3, 60
<i>Nocardia</i> sp. IR-SGS-T3 (MK611456.1)	60	5, 98
<i>Nocardia</i> sp. IR-SGS-T9 (MK719893.1)	60	3, 98
<i>Pantoea</i> sp.	120	24, 00/64, 00
<i>Proteus</i> sp.	120	16, 00/59, 00
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	90	1, 15
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 15692)	120	11, 00
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ISJ14	60	6, 50 - 8, 70
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> PAO1 (15729)	120	20, 00
<i>Pseudomonas citronellolis</i> EMBS027	4	17, 80
<i>Pseudomonas putida</i> (KT2440 ATCC 47054)	120	9, 00
<i>Pseudomonas</i> sp.	60	20, 00 - 30, 00
<i>Pseudomonas</i> sp.	150	21, 00
<i>Pseudomonas</i> sp.	120	61, 00
<i>Pseudomonas</i> sp. AKS2	45	5, 00 - 14 ,00
<i>Pseudomonas syringae</i> (DC3000 ATCC 10862)	120	11, 30
<i>Rhodococcus ruber</i> IR-SGS-T6 (MK611559.1)	60	6, 23
<i>Rhodococcus ruber</i> IR-SGS-T7 (MK611560.1)	60	3, 01
<i>Rhodococcus</i> sp. IR-SGS-T11 (MK719895.1)	60	5, 98

Continúa...

Bacterias	Días	Pérdida de peso (%)
<i>Serratia</i> sp.	150	40, 00
<i>Stenotrophomonas</i> sp.	150	21, 00
<i>Stenotrophomonas</i> sp. P2	100	7, 45
<i>Streptobacillus</i> sp. P4	30	12, 06
<i>Streptococcus</i> sp. P2	30	10, 16
<i>Streptomyces alborgiseolus</i> IR-SGS-T10(MK719894.1)	60	9, 50
<i>Streptomyces coelicoflavus</i> nbrc 15399	120	30, 00
<i>Streptomyces gancidicus</i> IR-SGS-K2 (MH819728.1)	60	2, 31
<i>Streptomyces</i> sp.	90	5, 20
<i>Streptomyces</i> sp.	120	40, 00
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-K1 (MK608363.1)	60	3, 40
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-K3 (MK608706.1)	60	3, 56
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T1 (MK608775.1)	60	4, 20
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T2 (MK608841.1)	60	3, 98
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T4 (MK611551.1)	60	6, 48
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T5 (MK611552.1)	60	5, 31
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-Y1(MK719896.1)	60	6, 69
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-Y2 (MK719898.1)	60	2, 46
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-Y3 (MK719897.1)	60	3, 64

Tabla 10

Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de hongos identificados en Asia, 2010 - 2022

Hongos	Días	Pérdida de peso (%)
<i>Aspergillus clavatus</i> JASK1	90	35, 00
<i>Aspergillus flavus</i>	60	31, 20
<i>Aspergillus flavus</i>	30	16, 10
<i>Aspergillus flavus</i>	120	11, 00
<i>Aspergillus niger</i>	60	38, 00
<i>Aspergillus niger</i>	90	0, 35
<i>Aspergillus niger</i>	90	28, 78
<i>Aspergillus niger</i>	30	22, 90
<i>Aspergillus niger</i>	120	72, 00
<i>Aspergillus nonius</i>	90	4, 90
<i>Aspergillus nonius</i>	45	6, 63
<i>Aspergillus oryzae</i>	60	26, 10
<i>Aspergillus oryzae</i>	90	25, 00 - 40, 00
<i>Aspergillus</i> sp. (FSM-3)	60	8, 00
<i>Aspergillus</i> sp. (FSM-5)	60	5, 00
<i>Aspergillus</i> sp. (FSM-6)	60	7, 00
<i>Aspergillus</i> sp. (FSM-7)	60	7, 00
<i>Aspergillus versicolor</i>	30	40, 60

Continúa....

Hongos	Días	Pérdida de peso (%)
<i>Colletotrichum fructicola</i>	90	48, 78
<i>Diaporthe italiana</i>	90	43, 90
<i>Fusarium</i> sp. (FSM-10)	60	9, 00
<i>Fusarium</i> sp. PS3	90	0, 59
<i>Neopestalotiopsis phangngaensis</i>	90	54, 34
<i>Penicillium chrysogenum</i> NS10 (KU559907)	90	36, 60
<i>Penicillium oxalicum</i> NS4 (KU559906)	90	34, 35
<i>Penicillium</i> sp. Ps2	90	0, 36
<i>Phanerodontia chrysosporium</i>	60	2, 50
<i>Phlebiopsis flavidoalba</i>	60	2, 60
<i>Rhizopus oryzae</i>	30	8, 40
<i>Saccharomyces</i> sp.	120	43, 00
<i>Schizophyllum commune</i>	60	9, 65
<i>Stagonosporopsis citrulli</i>	90	45, 12
<i>Thermomyces lanuginosus</i>	30	9, 21
<i>Thyrostroma jaczewskii</i> ,	90	46, 34
<i>Trichoderma</i> sp. (TL 1)	35	4, 87
<i>Trichoderma</i> sp. (TL 2)	35	7, 12
<i>Trichoderma</i> sp. (TL 3)	35	7, 51
<i>Trichoderma viride</i>	45	5, 13

Tabla 11

Eficiencia en la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE) expresada como pérdida de peso por actividad de consorcios bacterianos identificados en Asia, 2010 - 2022

Consortios bacterianos	Días	Pérdida de peso (%)
<i>P. protegens</i> bt-dsce02, <i>Stenotrophomonas</i> sp. bt-dsce03, <i>B. vallismortis</i> bt-dsce01, <i>Paenibacillus</i> sp.bt-dsce04	120	55, 00 - 75, 00
<i>Thiobacillus</i> sp. K29:AA29p, <i>Clostridium</i> sp.	30	5, 30 - 6, 40
<i>Enterobacter</i> sp.nov. bt DSCE01, <i>E. cloacae</i> nov. bt DSCE02, <i>P. aeruginosa</i> nov. bt. DSCE-CD03	160	64, 25
<i>Enterobacter</i> spp., <i>Pantoea</i> sp.	120	38, 00 - 81, 00

V. DISCUSIÓN

En la presente revisión sistemática se determinó que las publicaciones fueron más frecuentes en Asia resultado que puede ser atribuido a la mayor (52 %) producción de plásticos a diferencia de América, que solo produce en promedio 23 % a nivel mundial (Plastics Europe, 2021). Al respecto, Aróstica (2014) concluyó que el avance de la ciencia, tecnología y educación juega un papel importante en la reforma económica y el desarrollo de los países, como es el caso de China, que está adquiriendo mayor relevancia en el mundo científico, incrementando el número de investigadores y productos obtenidos superando a Japón, Europa y Estados Unidos. Cabe mencionar que se ha encontrado un menor número de documentos relacionados a la biodegradación del LDPE en América, resultado posiblemente relacionado a lo tedioso que llega a ser una publicación de artículos primarios, porque el investigador al momento de una publicación científica debe considerar la indexación, idioma, periodicidad, cantidad de artículos, factor de impacto, línea editorial, arbitraje, especialidad, lugar, soporte y tipo de revista, sin dejar de lado el cumplimiento de las normas y costos involucrados de la misma (Ganga, 2016).

Las bases de datos Scopus, WOS y Embase fueron seleccionadas debido a que presentan revistas indexadas de gran impacto biotecnológico, con arbitraje internacional, alto número de publicaciones, varios idiomas y además cuentan con acceso gratuito para los investigadores que pertenecen a la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Estas bases de datos también permiten filtrar lo que se quiere incluir o excluir de las investigaciones y transportar la información directa a Excel, facilitando el análisis de los datos. Los artículos incluidos de otras bases de datos fueron obtenidos de PubMed Central (PMC) especializada en ciencias Biomédicas y Biotecnológicas y IOPscience en contenido médico y técnico (Burnham, 2006).

Según la data analizada existe un incremento de estudios sobre microorganismos degradadores de LDPE en los últimos años, lo que confirma el interés del investigador por la búsqueda de soluciones que sean amigables con el ambiente (Flores, 2020). Los microorganismos con capacidad degradativa del LDPE aceleran e incrementan la degradación del LDPE y constituyen una alternativa para disminuir la acumulación de los petroplásticos en el ambiente. El requerimiento de tecnologías especiales permite al investigador conocer el grado de desintegración del polímero y la naturaleza de sus productos resultantes, como se demuestra en esta revisión bibliográfica; sin embargo, ningún estudio integra más de tres o cinco métodos, hecho que

demuestra deficiencias en el campo investigativo, posiblemente porque no son asequibles en todas las universidades o centros de investigación, por los costos involucrados.

Las estrategias utilizadas para investigar y monitorear la degradación del LDPE están relacionadas de manera indirecta con los microorganismos y de forma directa con el polímero. En cuanto a los microorganismos cultivados en medio Sales con LDPE como fuente de carbono se investiga la curva de crecimiento con base a la densidad óptica a 600 nm (Li et al., 2020; Bathia et al., 2014), se cuantifica la población microbiana, el contenido de biomasa y el dióxido de carbono liberado (Bathia et al., 2014), se monitorean los cambios del pH en el medio de cultivo (Awasthi et al., 2017; Duddu et al., 2015), se determina la hidrofobicidad de las células microbianas y la proteína de la biomasa formadora de la biopelícula (Gupta y Devi, 2019), el número de unidades formadoras de colonias por cm^2 , la viabilidad de las células y la biomasa de la biopelícula adherida al polímero (Gupta y Devi, 2020).

En cuanto al análisis del polímero LDPE se utilizan técnicas para la detección y cuantificación de la degradación. Al respecto, Esmaeili et al. (2013) y Kyaw et al. (2012) enfatizaron que la degradación del LDPE se verifica con la pérdida de peso del polímero (gravimetría), además de los cambios en la morfología de la superficie o estructurales (SEM), propiedades mecánicas (fuerza de tensión o porcentaje de elongación) y espectroscópicas o químicas (FTIR). En este contexto, las técnicas más utilizadas para la detección de la degradación de LDPE en los artículos científicos estudiados fueron SEM y FTIR y para la cuantificación la gravimetría. Se coincide con Quinchía y Maya (2015) quienes reportaron que la verificación de la biodegradación del LDPE se realiza por gravimetría (pérdida de peso), microscopía electrónica de barrido, SEM (cambios en la superficie) y espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier, FTIR (cambios en los grupos funcionales de la superficie), además de otros métodos como la calorimetría diferencial de barrido (cambios en la cristalinidad).

La detección de la biodegradación del LDPE se refleja fundamentalmente mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM). El análisis por SEM se utiliza para monitorear los cambios en la superficie de la película del LDPE. La adhesión de los microorganismos a la superficie es esencial para la biodegradación. Después de la incubación por 126 días del LDPE con microorganismos degradadores seleccionados, en la superficie se observó erosión, agujeros y cavidades, atribuidos a la formación de película bacteriana y penetración de las hifas de los hongos

(Esmaeli et al., 2013). La erosión es considerada la causa primaria de la reducción de masa de la superficie debido a la secreción de enzimas y metabolitos extracelulares microbianos (Gupta y Devi, 2020). Se ha demostrado que la degradación de la superficie aparece después de 80 días de incubación y las microgrietas se observan después de 80-120 días a pesar que la biopelícula se verifica desde los 40 días (Kyaw et al., 2012), aunque también se ha registrado la biopelícula adherida y las grietas en el polímero después de 60 días de incubación (Das y Kumar, 2015).

En el LDPE colonizado por hongos durante 90 días se observó la colonización microbiana, erosión, grietas, dobleces (Gajendiran et al., 2016), porosidad, cavidades, fisuras, rayaduras y grietas que le dan una textura rugosa al polímero (Gajendiran et al., 2017). En este contexto, el análisis SEM registra los cambios superficiales del LDPE (Quinchía y Maya, 2015) como deformaciones, erosión, grietas, fisuras, agujeros, dobleces, rajaduras, cavidades, porosidad e inclusive estructuras de reproducción como parte del desarrollo de los hongos sobre el polímero (Dey et al., 2020; Gajendiran et al., 2017).

Además de las modificaciones visibles (surcos, grietas, erosión, rugosidad) el AFM evidencia incremento en los parámetros de nanorugosidad. Por ejemplo, el aumento de la altura máxima de rugosidad (R_2) A 154 nm sugiere la presencia de grandes surcos y agujeros que indica la penetración de las células microbianas en la superficie del LDPE y por tanto, la iniciación de la degradación del plástico debido a la acción enzimática en su mayoría de lacasas, esterases, mono-oxidasas, peroxidasas (Dey et al., 2021). Los genes que codifican para las lacasas y alciano hidroxilasas involucradas en la biodegradación enzimática del LDPE han sido amplificadas en *B. subtilis*, *B. wiedmannii*, *B. siamensis*, *B. cereus*, *B. subtilis*, con los cuales previamente se demostraron alteraciones morfológicas y físicas del polímero como producto de su desarrollo y actividad metabólica *in vitro* (Maroof et al., 2021). Las enzimas extracelulares desempeñan un rol muy importante en la biodegradación mediante la despolimerización del LDPE para formar productos intermedios que pueden ser utilizados como fuente de carbono por los microorganismos (Maroof et al., 2021).

El ataque del LDPE se evidencia con la colonización de la superficie y penetración de los microorganismos, proceso que puede ser observado mediante AFM y SEM (Dey et al., 2021; Maroof et al., 2021). La superficie del polímero muestra cambios físicos con una ligera alteración debido a la colonización microbiana, a diferencia del control que presenta una superficie lisa. Este cambio

no se encuentra distribuido en forma uniforme debido a que los microorganismos no se adhieren en toda la superficie, sino que se distribuyen en forma aleatoria. El tiempo requerido para observar este cambio es variado. Después de 100 días de incubación con *Bacillus* spp. se observa una ligera alteración de la superficie que indica que la biodegradación es un proceso lento y continuo (Maroof et al., 2021). La adhesión de los microorganismos a la superficie del polímero es crucial para la biodegradación. La biopelícula microbiana sobre el LDPE se observa desde los 40 días (Kyaw et al., 2012), 60 días (Das y Kumar, 2015), 90 días (Gajendiran et al., 2016) e inclusive se ha observado penetración de las hifas y formación de estructuras de reproducción después de 30 días de incubación (Pramila y Vijaya, 2011).

Los cambios morfológicos son sustentados por los cambios químicos en las cadenas carbonadas demostrados por FTIR que es una técnica analítica eficiente para identificar material orgánico, polimérico e inorgánico y su configuración química. Se observan nuevos grupos funcionales (alcoxi, acil, carboxilos y nitro) y modificaciones en las cadenas como rupturas, estiramientos y formación de dobles enlaces. La hidrofobicidad del LDPE se reduce debido a la incorporación de los enlaces funcionales y se facilita la acción microbiana. El incremento de los índices (carbonilo, CI; doble enlaces, DBI y terminaciones con doble enlace, TDBI) y el análisis del espectro (FTIR) sugiere que el proceso degradativo se inicia con la formación de radicales que mejoran la oxidación con ayuda del oxígeno y agua. Los productos de la oxidación son transformados a grupos funcionales y grupos vinileno posiblemente por los mecanismos Norrish tipos I y II. De esta forma, la hidrofobicidad de la superficie del plástico se reduce y las enzimas microbianas pueden mejorar el proceso degradativo.

La presencia de grupos alcoxi y acil indican la hidrólisis de los ésteres y formación de alcoholes por la acción de enzimas hidrolíticas (cutinasas, lipasas, esterasas, alcano monoxidasas). Los enlaces carbonilo se pueden formar debido a la acción de las lacasas. Los ésteres y alcoholes pueden ser convertidos en pequeños ácidos grasos previa formación de aldeídos por las enzimas deshidrogenasas. Así los ácidos grasos son metabolizados a través de β -oxidación y consecuentemente son asimilados (Dey et al., 2020). Al respecto, Kumar y Raut (2015) concluyeron que para establecer la extensión de la biodegradación se deben monitorear siete características del LDPE tratado con microorganismos. Estos son los grupos funcionales en la superficie (FTIR), hidrofobicidad/hidrofiliidad, cristalinidad, topografía de la superficie (SEM),

propiedades mecánicas, determinación del peso molecular y consumo del polímero (gravimetría). De estas características, tres son predominantes en las publicaciones científicas: Topografía de la superficie y grupos funcionales de la superficie para la detección y gravimetría para la cuantificación de la degradación del polímero.

Previo a la prueba cuantitativa de la degradación del LDPE se realizan evaluaciones que verifican el ataque de los microorganismos al polímero. El análisis FTIR determina el índice de carbonilo y la presencia o ausencia de grupos funcionales. El índice carbonilo (IC) es una medida de la concentración de los grupos carbonilo correspondientes a los ácidos, aldehídos y cetonas (Uribe et al., 2010). El espectro infra-rojo (IR9) se analiza en la región de los grupos funcionales ($1200 - 3600 \text{ cm}^{-1}$) y en la región de “huella digital” ($600 - 1200 \text{ cm}^{-1}$), donde los picos varían solo cuando el polímero ha sido degradado de manera física, química o biológica (Uribe et al., 2010). En todas las bandas entre 800 y 1400 cm^{-1} se reportan cambios por acción de los microorganismos y entre 1700 y 1800 cm^{-1} se observan nuevos grupos que pueden ser asignados a los aldehídos, cetonas, ácidos y ésteres provenientes de la degradación (Quinchía y Maya, 2015).

En el control, las bandas de absorción son originadas a 719 cm^{-1} ($-\text{C}-\text{H}$); 1472 cm^{-1} ($\text{C}=\text{C}$), 2660 cm^{-1} (CHO), 2919 y 2859 cm^{-1} ambas de los enlaces $\text{C}-\text{H}$ (Awasthi et al., 2017; Das y Kumar, 2015) aunque también son considerados $729, 01 \text{ cm}^{-1}$ ($-\text{C}-\text{H}$); $1465. 59 \text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}=\text{C}$); 1713.55 cm^{-1} (CHO) y 2916 y 2855 cm^{-1} ($\text{C} - \text{H}$). Asimismo, se diferencian $2820 - 2850 \text{ cm}^{-1}$ ($=\text{C}-\text{H}$) y 1371 cm^{-1} de enlaces $-\text{C}-\text{H}$ (Soleimani et al., 2020).

En la biodegradación del polietileno se distinguen tres etapas, en la primera el polímero es fragmentado en oligómeros, dímeros y monómeros (bajo peso molecular) mediante la oxidación biológica o mediante actividad enzimática. Como consecuencia de la ruptura de las cadenas se forman ácidos grasos por reacciones oxidantes en la segunda etapa y finalmente estos son metabolizados a dióxido de carbono y agua (Li et al, 2020). En este contexto el análisis FTIR del LDPE degradado por la bacteria marina *Microbulbifer hydrolyticus* demostró nuevos grupos funcionales como hidroxilos (3392 cm^{-1}) y carboxilos (1644 cm^{-1}) que evidenciaron la oxidación de la superficie. Asimismo, se observó un pico a 3195 cm^{-1} atribuido a los enlaces $\text{C}=\text{C}$ que son más fácilmente rotos que los enlaces saturados $\text{C}-\text{C}$ en el polietileno (Li et al., 2020). Por su parte en el LDPE degradado por *Streptomyces* sp. (60 días) se observaron las bandas de los carbonilos ($1670\text{-}1820 \text{ cm}^{-1}$) debido a la formación de grupos cetona o aldehído ($\text{C}=\text{O}$) por acción microbiana,

picos a $1050\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$ (C-O), $2020\text{--}2260\text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}\equiv\text{C}$) y nuevas bandas a $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ que correspondieron a fracciones oxidados como las moléculas con grupos --OH resultantes de la biodegradación (Soleimani et al., 2020).

El análisis FTIR del polímero tratado con *Pseudomonas* sp. demostró estiramientos de CH ($3, 386.9\text{--}3,400.9\text{ cm}^{-1}$), deformaciones de CH_2 ($1,590.6\text{--}1,595.7\text{ cm}^{-1}$), enlaces CH_2 aromáticos ($1457.3\text{--}1463.6\text{ cm}^{-1}$) y enlaces CH_2 simétricos a $1351.2\text{--}1351.3\text{ cm}^{-1}$ en picos adicionales a 1128 cm^{-1} . La adicción, pérdida y alteraciones de los picos de los grupos funcionales son la mayor evidencia de los cambios estructurales del polímero (Bathia et al., 2014).

El índice de carbonilo mide el grado de degradación del LDPE porque su valor depende de los enlaces carbonilo degradados (Kyaw et al., 2012). Los grupos carbonilo pueden incrementarse y reducirse. En el proceso de biodegradación del LDPE el paso inicial corresponde a la oxidación de la cadena que origina la formación de grupos carbonilo. Posteriormente, éstos forman grupos carboxílicos que son degradados por B-oxidación y luego mediante el ciclo del ácido cítrico hasta CO_2 y H_2O (Esmaili et al., 2013). Al respecto, Gupta y Devi (2020) demostraron incremento en el porcentaje de grupo carbonilo del LDPE después de 60 días de incubación con *P. aeruginosa*, así como también Abraham et al. (2016) registraron incremento en el porcentaje de estos grupos en el LDPE después de 90 días de incubación con *Apergillus nomius* y *Streptomyces* sp.

El análisis FTIR monitorea los cambios en los grupos carbonilo y en las terminaciones con doble enlace. El pico a 1712 cm^{-1} típico de los carbonilos se redujo en forma significativa después de 90 días de incubación del polímero con *Bacillus* spp. La formación y reducción de los residuos carbonilo evidenció la degradación microbiana. La reducción también se mide en términos de índice de carbonilo (CI) que es calculado con base a la intensidad relativa del grupo carbonilo a 1712 cm^{-1} y el grupo CH_2 a 1462 cm^{-1} (Maroof et al., 2021).

Pramila y Vijaya (2015) demostraron 0,1% de incremento de los índices de carbonilo (C-O) en el LDPE tratado con *Acinetobacter baumannii* por 30 días. Por el contrario, Uribe et al. (2010) reportaron 4 - 83 % de reducción de los índices de carbonilo después del enriquecimiento por 60 días de microorganismos de tiras de LDPE deteriorado colectadas en un relleno sanitario. Los microorganismos autóctonos del suelo pueden reducir (5, 6 %) el índice de carbonilo; no obstante, los microorganismos degradadores de LDPE seleccionados lo reducen en 42 % (Esmaili et al., 2013); 80 % (Kyaw et al., 2012) y 83 % (Uribe et al., 2010). Los grupos carbonilo son el

producto mayoritario de la acción de las enzimas involucradas en la biodegradación como son las oxidorreductasas. Las enzimas catalizan reacciones de oxidación, reducción, hidrólisis, esterificación y escisión molecular interna (Gupta y Devi, 2020).

El incremento de los índices es un resultado primario en la degradación de LDPE. Dey et al. (2020) determinaron incremento no solo del índice carbonilo (15 - 20 puntos) sino también del índice de dobles enlaces, DBI (1, 5 - 2 puntos) y del índice de terminaciones con doble enlace, TDBI (30 - 40 puntos) métodos que confirmaron oxidaciones, formación de vinilo y ruptura de las cadenas durante la degradación del LDPE. Por el contrario, Uribe et al. (2010) reportaron reducción (4 - 83 %) de los índices de carbonilo, así como también de 6 - 20 % de las terminaciones con doble enlace ($C = O$).

La disminución del índice de carbonilo y el incremento de las terminaciones con doble enlace son características del mecanismo propuesto en la biodegradación del polietileno. Los grupos carbonilo formados en la cadena polimérica resultan de la acción de factores abióticos y pueden ser degradados por los microorganismos con la correspondiente reducción del índice de carbonilo y liberación de cadenas insaturadas e incremento de las terminaciones con dobles enlaces (DBI). Los grupos oxidados son transformados a ácidos carboxílicos a través de la β -oxidación (Esmaeili et al., 2013). Al respecto Awasthi et al. (2017) demostraron incremento de la absorción de la banda a 1720 cm^{-1} debido a la formación de enlaces carbonilo por oxidación de fracciones del LDPE durante el tratamiento térmico ($170\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 10 días). A su vez Gupta y Devi (2019) determinaron incremento de las terminaciones de doble enlace ($905\text{-}915\text{ cm}^{-1}$) en el LDPE incubado con *Bacillus* spp. durante 60 días. Los investigadores explicaron el incremento por la reacción de Norrish tipo II que tienen lugar durante la formación de los enlaces dobles. Asimismo, Gupta y Devi (2020) determinan el incremento en las terminaciones con doble enlace en el LDPE degradado por *P. aeruginosa*.

Los grupos de microorganismos reportados como degradadores del LDPE en las publicaciones científicas revisadas correspondieron a bacterias y hongos. Respecto a las bacterias se coincide con Maroof et al. (2021), Butrón (2020), Dey et al. (2020), Guta y Devi (2020), Li et al. (2020) y Soleimani et al. (2020), entre otros investigadores. En cuanto a los hongos se coincide con Munir et al. (2018), Awasthi et al. (2017), Gajendiran et al. (2017), Gajediran et al. (2016) y

Quinchía y Maya (2015). Asimismo, investigadores como Abraham et al. (2016), Esmaeili et al. (2013) y Uribe et al. (2010), reportaron bacterias y hongos como degradadores del LDPE.

La predominancia de bacterias Gram positivas entre los microorganismos degradadores de LDPE coincide con las investigaciones de Maroof et al. (2021), Soleimani et al. (2020), Gupta y Devi (2019), Munir et al. (2018) y Das y Kumar (2015). Entre las bacterias Gram positivas predominaron especies de *Bacillus* como *B. siamensis*, *B. wiedmannii*, *B. cereus*, *B. subtilis* (Maroof et al., 2021) y *B. amyloliquefaciens* (Das y Kumar, 2015). Las bacterias Gram negativas también son eficientes en la degradación del LDPE (Dey et al., 2020) y predominaron las especies de *Pseudomonas* como *P. aeruginosa* (Butrón, 2020; Gupta y Devi, 2020), *P. protegens* (Skariyachan et al., 2017), *P. citronellolis* (Bathia et al., 2014), *P. putida* y *P. syringae* (Kyaw et al., 2012).

El análisis de la diversidad bacteriológica confirmó la dominancia del género *Pseudomonas* reconocido por su capacidad para metabolizar el polietileno, su excepcional habilidad para colonizar diversos nichos ecológicos y su resistencia a diferentes medios y condiciones bióticas y abióticas con mayor eficiencia que otros microorganismos (Ccalo et al., 2020; Medri et al., 2016). *Bacillus* también forma parte de las bacterias mayormente investigadas, resultado que coincide con Muthukumar y Veerappapilla (2015), quienes determinaron que la especie *B. cereus* es la más frecuente en la biodegradación de plásticos, debido en parte a su capacidad de adherirse a la superficie del polímero (Medri et al., 2016). Por su parte, Maroof et al. (2021) demostraron que entre los microorganismos degradadores del LDPE predominaron las bacterias Gram positivas y que las especies del género *Bacillus* fueron más eficientes en disminuir el peso del polímero (3, 75 - 8, 46 %) y superaron a las Gram negativas *P. aeruginosa* y *Acinetobacter iwoffii* con 1, 15 y 0, 76 % de pérdida de peso, respectivamente.

Las bacterias desarrollan sobre el LDPE y se observa un incremento gradual de la densidad óptica ($DO_{600\text{ nm}}$), en relación directa con el número de unidades formadoras de colonias mL^{-1} (Munir et al., 2018). La densidad poblacional aumenta en forma creciente hasta las 4 horas y luego se incrementa rápidamente entre las 4 y 10 horas. En bacterias como *Micobulbifer hidrolyticus* la curva de crecimiento se estabiliza a las 10 horas (Li et al., 2020) y se observan significativas variaciones en la turbidez debido al crecimiento bacteriano hasta por 100 días con LDPE como fuente de carbono (Dey et al., 2020).

En la superficie del polímero biodegradado se observa (SEM) erosión, grietas, agujeros, rugosidades y biopelículas adheridas y en la superficie del control se mantiene la superficie lisa (Gupta y Devi, 2019). Las variaciones en la superficie del polímero tratado con bacterias también pueden ser confirmados bajo el microscopio compuesto como lo demostró Butrón (2020), quien observó grietas, agujeros, fragmentación e inclusive decoloración y formación de biopelículas con manchas amarillas verdosas en el LDPE degradado por *P. aeruginosa*. También es necesario diferenciar que el polímero LDPE cuyo peso fue reducido por *Streptomyces* sp. mostró una superficie lisa, sin deterioro al igual que el control (Soleimani et al., 2020).

Los hongos desarrollan sobre el LDPE y se observa incremento marcado de la biomasa fresca del micelio conforme transcurre el tiempo, así como también del dióxido de carbono liberado durante el proceso (Pramila y Vijaya, 2011). Asimismo, se puede determinar el porcentaje de invasión del LDPE que oscila entre 32 a 90 % según la temperatura (Abraham et al., 2016). En el polímero biodegradado por 40 días se observa la biopelícula formada por los hongos fuertemente adheridos, a los 80 días se evidencia deformación de la superficie y se diferencian microgrietas (Kyaw et al., 2012). A los 126 días se observa erosión, agujeros y cavidades atribuidos a la penetración de las hifas (Esmaili et al., 2013); no obstante, también a los 30 días de incubación se ha reportado la observación del crecimiento de las hifas en la superficie del polímero, formación de cavidades y esporas o estructuras de reproducción formadas como parte del desarrollo de *Rhizopus oryzae* (Pramila y Vijaya, 2011).

La gravimetría es una prueba simple y muy precisa que determina la reducción del peso del polímero como consecuencia de ser utilizada como fuente de carbono y energía por los microorganismos. La pérdida de peso es proporcional al área superficial porque la biodegradación se inicia en la superficie del polímero (Das y Kumar, 2015). Con bacterias Gram positivas se ha reportado pérdida de peso del LDPE de 5, 2 % (90 días) con *Streptomyces* sp. (Abraham et al., 2016); 11 % (60 días) con *Bacillus amyloliquefaciens* (Das y Kumar, 2015); 30 % (28 días) con *Streptomyces coelicoflavus* (Duddu et al., 2015); 9, 5 % (60 días) con *Streptomyces albobrisesolus* (Soleimani et al., 2020) y 8, 5 % (90 días) con *B. siamensis* (Maroof et al., 2021). Con bacterias Gram negativas se ha reportado 17 % (4 días) con *Pseudomonas citronellolis* (Bathia et al., 2014); 8, 7 % (60 días) con *P. aeruginosa* (Gupta y Devi, 2020); 27, 3 % (30 días) con *P. aeruginosa* (Butron, 2020); 8 % (100 días) con *Stenotrophomonas* (Dey et al., 2020). Inclusive se ha registrado

75 % de peso del LDPE perdido después de 120 días de incubación con un consorcio bacteriano termófilo constituido por *Bacillus vallismortis*, *Pseudomonas protegens*, *Stenotrophomonas* sp. y *Penibacillus* sp. (Skariyachan et al., 2019).

En el LDPE degradado por hongos se ha determinado pérdida de peso de 4, 9 % (90 días) con *A. nomius* (Abraham et al., 2016); 6, 63 % (45 días) con *A. nomius* (Munir et al., 2018), 35 % (90 días) con *A. clavatus* (Gajendiran et al., 2016) y 40, 6 % (90 días) con *A. versicolor* (Gajendiran et al., 2017). Los valores reportados en las investigaciones científicas son diversos, no siempre guardan relación con el tiempo de incubación e inclusive se tiene resultados contradictorios por microorganismos de la misma especie como es *P. aeruginosa*, con 27, 3 % de pérdida de peso del LDPE a los 30 días (Butron, 2020) y 8, 7 % a los 60 días (Gupta y Devi, 2020).

La variación en el porcentaje de peso del LDPE perdido que determina la eficiencia en la biodegradación reportado en las diversas publicaciones científicas puede ser explicado por el lugar de procedencia del microorganismo, el grosor de la película del polímero y las condiciones de cultivo como el tiempo de incubación (Maroof et al., 2021). Según Awasthi et al. (2017) la pérdida de peso del polímero está relacionada en forma directa con el tiempo de incubación. Estos investigadores determinaron valores en el peso perdido de 2, 89 % (10 días); 5, 92 % (20 días) y 8, 4 % (30 días); no obstante, también depende de la temperatura y del pH (Butron, 2020; Islami et al., 2019). Al respecto, la pérdida de peso del LDPE por acción microbiana (30 días) fue de 5, 3 % a 30 °C y 1, 3 % a 25° C y de 6, 4 % a pH 7 y 2, 6 % a pH 5 (Islami et al., 2019).

Se ha determinado que *P. aeruginosa* cultivada en el LDPE como única fuente de carbono tiene una tasa de consumo de 0, 0015 g de LDPE por día y necesita en promedio 462 días para reducir una película de polietileno a la mitad de 1g hasta 0, 5 g (Gupta y Devi, 2020). También se ha reportado que *Bacillus* sp. tiene una tasa de consumo de 0, 0019 g del polímero por día (Awasthi et al., 2017). Los microorganismos degradadores de LDPE, forman biopelícula en el polímero y lo utilizan como fuente de carbono para el consumo, evento que se refleja en la pérdida de peso. A pesar que la biodegradación es un proceso lento, el recuento de células viables y la concentración de proteínas de la superficie además de la eficiencia en la degradación expresada como pérdida de peso del polímero reflejan la elevada actividad metabólica después de 60 días de incubación (Gupta y Devi, 2020). Asimismo, con base a las pruebas de detección y cuantificación de la degradación del polímero se concluye que los microorganismos reportados en las investigaciones revisadas son

candidatos para la degradación del polímero sin ningún pretratamiento y por tanto constituyen una alternativa sostenible para la disminución de la contaminación del ambiente por el LDPE.

VI. CONCLUSIONES

- 6.1. En la revisión sistemática de las bases de datos de Scopus, Web of science y Embase, se analizaron 45 artículos sobre microorganismos degradadores de LDPE identificados en América y Asia, 2010 - 2022.
- 6.2. Los métodos más utilizados (68, 88 %) para la detección de la degradación del LDPE en las publicaciones de América y Asia, 2010 - 2022 fueron Microscopía electrónica de barrido, (SEM) y Espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier, (FTIR). El método más utilizado (100 %) para la cuantificación de la degradación del LDPE fue la Gravimetría o pesaje.
- 6.3. Los microorganismos degradadores del LDPE identificados en América y Asia, 2010 - 2022 correspondieron a los reinos Bacteria en el 62 % y Fungi en el 38 % de las publicaciones. Las bacterias fueron Gram positivas (55 %) y Gram negativas (45 %). El género *Pseudomonas* fue el predominante (33, 33 %), seguido de los géneros *Bacillus* (20 %) y *Streptomyces* (8, 89 %). Entre los hongos predominó el género *Aspergillus* (26, 67 %) seguido de *Penicillium* (6, 67 %).
- 6.4. En las publicaciones 2010 - 2022 de América la eficiencia a la degradación expresada como pérdida de peso del LDPE por bacterias fue de 8, 20 - 30, 80 % y en hongos fue de 0, 66 - 35, 3 %. En las publicaciones de Asia la eficiencia de las bacterias a la degradación fue de 0,76 - 64, 00 % y en hongos fue de 0, 35 - 72, 00 %.

VII. RECOMENDACIONES

Realizar el aislamiento y selección de microorganismos degradadores de LDPE para comparar la eficiencia en condiciones de laboratorio y de campo.

Determinar la eficiencia en la degradación del LDPE por consorcios de bacterias y hongos seleccionados.

VIII. REFERENCIAS

- Abraham, J., Gosh, E., Mukherjee, P. y Gajendiran, A. (2016). Microbial Degradation of Low Density Polyethylene. *The Global Home of Chemical Engineers AIChE*, 36(1), 147 - 154. <https://doi.org/10.1002/ep.12467>
- Acuña, N. (2017). *Revisión bibliográfica sobre los microorganismos biodegradadores de polietileno de baja densidad y sus efectos en el material* [tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional UDFJC. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5608/Acu%C3%B1aMolinaNelsonRicardo2017.pdf?sequence=1>
- Alvitres, V. (2000). *Método Científico: Planificación de la Investigación* (2ª ed). Ciencia. <http://biblioteca.untumbes.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=36>
- Ararat, C. y Murillo, E. (2016). Polietileno de baja densidad funcionalizado con un poliéster poliol altamente ramificado maleinizado. *Ingeniería y Ciencia*, 12(23), 127 - 144. <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v12n23/v12n23a08.pdf>
- Aróstica, P. (2014). *China en transición a la sociedad del conocimiento: implicaciones para América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/36638/S2014148_es.pdf
- Awasthi, S., Srivastava, N., Singh, T., Tiwary, D. y Kumar, P. (2017). Biodegradation of thermally treated low density polyethylene by fungus *Rhizopus oryzae* NS 5. *3 Biotechnology*, 7(73), 1 - 8. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0699-4>
- Bardají, D., Furlan, J. y Stehling, E. (2019). Isolation of a polyethylene degrading *Paenibacillus* sp. from a landfill in Brazil. *Archives of Microbiology*, 201(5), 699 - 704. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01637-9>
- Khandare, S., Chaudhary, D. y Jha, B. (2021). Marine bacterial biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) plastic. *Biodegradation*, 32(1), 127 - 143. <https://doi.org/10.1007/s10532-021-09927-0>
- Bhatia, M., Girdhar, A., Tiwari, A. y Nayariseri, A. (2014). Implications of a novel *Pseudomonas* species on low density polyethylene biodegradation: an *in vitro* to *in silico* approach. *SpringerPlus*, 3(497), 1 - 10. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-497>
- Burnham, J. (2006). Scopus database: A review. *Biomedical digital libraries*, 3(1), 1 - 8.

10.1186/1742-5581-3-1.

- Butrón, S. (2020). Capacidad de biodegradación de *Pseudomonas aeruginosa* frente al polietileno de baja densidad. *Revista de Investigaciones de la Escuela de Posgrado*, 9(3), 1671 - 1684. <http://revistaepgunapuno.org/index.php/investigaciones/article/view/2027/0>
- Cardona, D., Lavernia, C. y Alcerro, J. (2010). Polietileno. *Acta Ortopédica Mexicana*, 24(2), 123 - 128. <https://www.medigraphic.com/pdfs/ortope/or-2010/or102m.pdf>
- Ccalo, M. y Sacaca, F. (2020). *Una revisión de la biodegradación de plásticos por Pseudomonas* [tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. Repositorio institucional UPU. https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3333/Magali_Trabajo_Bac_hiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chaudhary, A., Chaitanya, K., Dalmia, R. y Vijayakumar, R. (2021). Synergistic effect of UV, thermal, and chemical treatment on biological degradation of low-density polyethylene (LDPE) by *Thermomyces lanuginosus*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(513), 1 - 11. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09296-4>
- Coreño, J. y Méndez, M. (2010). Relación estructura-propiedades de polímeros. *Educación Química*, 21(4), 291 - 299. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2010000400006
- Das, M. y Kumar, S. (2014). Microbial deterioration of low density polyethylene by *Aspergillus* and *Fusarium* sp. *International Journal of ChemTech Research*, 6(1), 299 - 305. [https://sphinxsai.com/2014/ChemTech/JM14CT1_50/CT=35\(299-305\)JM14.pdf](https://sphinxsai.com/2014/ChemTech/JM14CT1_50/CT=35(299-305)JM14.pdf)
- Das, M. y Kumar, S. (2015). An approach to low-density polyethylene biodegradation by *Bacillus amyloliquefaciens*. *Biotechnology*, 5(1), 81 - 86. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0205-1>
- De Silva, J., Jayasekera, G. y Nanayakkara, C. (2019). Identification of potential fungal degraders of low density polyethylene (LDPE). *Journal Biological Series*, 2(4), 76 - 81. <https://doi.org/10.4038 /jsc.v10i2.20>
- Delacuvellerie, V., Gobert, S., Benali, S. y Wattiez, R. (2019). The plastisphere in marine ecosystem hosts potential specific microbial degraders including *Alcanivorax borkumensis* as a key player for the low density polyethylene degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 380(1), 2 - 11. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120899>

- Dey, A., Bose, H., Mohapatra, B. y Sar, P. (2020). Biodegradation of Unpretreated Low-Density Polyethylene (LDPE) by *Stenotrophomonas sp.* and *Achromobacter sp.*, Isolated From Waste Dumpsite and Drilling Fluid. *Frontiers in Microbiology*, 11(1), 1 - 15. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33391224/>
- Duddu, M., Tripura, K., Guntuku, G. y Divya, D. (2015). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by a new biosurfactant-producing thermophilic *Streptomyces coelicoflavus* NBRC 15399T. *African Journal of Biotechnology*, 14(4), 327 - 340. <https://doi.org/10.5897/AJB2014.14224>
- Elías, R. (2015). Mar de plástico: una revisión del plástico en el mar. *Revista de la Investigación y Desarrollo Pesquero*, 27(1), 83 - 105. https://www.oceandocs.org/bitstream/handle/1834/10964/RevINIDEP27_83.pdf
- Esmaeili, A., Pourbabae, A., Alikhani, H., Shabani, F. y Esmaeili, E. (2013). Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by Mixed Culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in Soil. *Public Library of Science one*, 8(9), 1 - 10. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24086254/> ES DE IRAN
- Flores, P. (2020). «La problemática del consumo de plásticos durante la pandemia de la covid-19». *South Sustainability*, 1(2), 1 - 9. <https://revistas.cientifica.edu.pe/index.php/southsustainability/article/download/733/750>
- Gajendiran, A., Krishnamoorthy, S. y Abraham, J. (2016). Microbial degradation of low-density polyethylene (LDPE) by *Aspergillus clavatus* strain JASK1 isolated from landfill soil. *Biotechnology*, 6(52), 2 - 6. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0394-x>
- Gajendiran, A., Subramani, S. y Abraham, J. (2017). Effect of *Aspergillus versicolor* strain JASS1 on low density polyethylene degradation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 263(2), 1 - 7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/263/2/022038>
- Ganga, F., Castillo, J. y Pedraja, L. (2016). Factores implicados en la publicación científica: una revisión crítica. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(4), 615 - 627. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052016000400007>
- Ghatge, S., Yang, Y., Hyung, J. y Gil, H. (2020). Biodegradation of polyethylene: A brief review. *Applied Biological Chemistry*, 63(27), 1 - 14. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00511-3>

- Gonzales, V. (2020). Capacidad biodegradativa de hongos filamentosos frente al polietileno. *Revista de Investigaciones de la Escuela de Posgrado*, 9(3), 1792 - 1804. <http://www.revistaepgunapuno.org/index.php/investigaciones/article/view/1625>
- Gupta, K. y Devi, D. (2019). Biodegradation of Low Density Polyethylene by Selected *Bacillus* sp. *Gazi University Journal of Science*, 32(3), 802 – 813. <https://doi.org/10.35378/gujs.496392>
- Gupta, K. y Devi, D. (2020). Characteristics investigation on biofilm formation and biodegradation activities of *Pseudomonas aeruginosa* strain ISJ14 colonizing low density polyethylene (LDPE) surface. *Heliyon*, 6(7), 1 - 11. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04398>
- Harshvardhan, K. y Bhavanath, J. (2013). Biodegradation of low-density polyethylene by marine bacteria from pelagic waters, Arabian Sea, India. *Marine Pollution Bulletin*, 77(2), 100 - 106. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.025>
- Hikmah, M., Setyaningsih, R. y Pangastuti, A. (2018). The potential of Lignolytic Trichoderma isolates in LDPE (Low Density Polyethylene) plastic biodegradation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 333(1), 1 - 7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/333/1/012076>
- Hurley, R. y Nizzetto, L. (2018). Fate and occurrence of micro(nano)plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks. *Environmental Science & Health*, 1(1), 6 - 11. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ª ed). McGraw Hill Education. <https://www.uca.ac.cr/wpcontent/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Islami, A., Tazkiaturrizki, T. y Rinanti, A. (2019). The effect of pH-temperature on plastic allowance for Low- Density Polyethylene (LDPE) by *Thiobacillus* sp. and *Clostridium* sp. *Journal of Physics: Conference Series*, 1402(3), 1 - 6. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1402/3/033003>
- Jayaprakash, V. y Palempalli, U. (2018). Effect of Palmitic Acid in the Acceleration of Polyethylene Biodegradation by *Aspergillus oryzae*. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 12(4), 2259 - 2268. <https://doi.org/10.22207/JPAM.12.4.66>

- Jaysree, R., Subhash, K. y Sankar T. (2019). Biodegradability of Synthetic Plastics -A Review. *International Journal of Chemical Technology Research*, 12(6), 125 - 133. <https://doi.org/10.20902/ijctr.2019.120616>
- Khruengsai, S., Sripahco, T. y Pripdeevech, P. (2021). Low-Density Polyethylene Film Biodegradation Potential by Fungal Species from Thailand. *Journal Fungi*, 7(594), 1 - 18. <https://doi.org/10.3390/jof7080594>
- Khruengsai, S., Sripahco, T. y Pripdeevech, P. (2022). Microbial degradation of low-density polyethylene by *Neopestalotiopsis phangngaensis*. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 68(6), 1 - 13. <https://doi.org/10.2323/jgam.2022.07.001>
- Konduri, M., Koteswarareddy, G., Kumar, D., Reddy, B., y Narasu, M. (2011). Effect of pro-oxidants on biodegradation of polyethylene (LDPE) by indigenous fungal isolate, *Aspergillus oryzae*. *Journal of Applied Polymer Science*, 120(6), 3536 - 3545. <https://doi.org/10.1002/app.33517>
- Kyaw, B., Champakalakshmi, R., Sakharkar, M., Lim, C. y Sakharkar, K. (2012). Biodegradation of Low Density Polythene (LDPE) by *Pseudomonas* Species. *Indian Journal of Microbiology*, 52(3), 411 - 9. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12088-012-0250-6>
- Labeaga, A. (2018). *Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Educación a Distancia]. Repositorio Institucional UNED. http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Alabeaga/Labeaga_Viteri_Aitziber_TFM.pdf
- Li, Z., Wei, R., Gao, M., Ren, Y., Yu, B., Nie, K., Xu, H. y Liu, L. (2020). Biodegradation of low-density polyethylene by *Microbulbifer hydrolyticus* IRE-31. *Journal of Environmental Management*, 263(1), 1 - 8. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110402>
- Liu, X., Zhang, Y., Sun, Q., Liu, Z., Zhao, Y., Fan, A. y Su, H. (2022). Rapid colonization and biodegradation of untreated commercial polyethylene wrap by a new strain of *Bacillus velezensis* C5. *Journal of Environmental Management*, 301(1), 1 - 9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113848>

- Madina, K. y Amin, R. (2021). An overview on impact and application of microorganisms on human health, medicine and environment. *Biological and Pharmaceutical sciences*, 14(1), 89 - 104. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2021.16.1.0200>
- Mahalakshmi, V. (2014). Evaluation of Biodegradation of Plastics. *International Journal of Innovative Research y Development*, 3(7), 185 - 190. <https://www.researchgate.net/publication/324602647>
- Matjašič, T., Simčič, T., Medvešček, N., Bajt, O., Dreo, T. y Mori, N. (2021). Critical evaluation of biodegradation studies on synthetic plastics through a systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 752(1), 1 - 16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141959>
- Maroof, L., Khan, I., Yoo, H., Kim, S., Park, H. Ahmad, B. y Azam, S. (2021). Identification and characterization of low density polyethylenedegrading bacteria isolated from soils of waste disposal sites. *Environmental Engineering Research*, 26(3), 1 - 9. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.167>
- Medri, R., Minillo, A., De Macedo, E., Ferreira, H. y Pereira, E. (2016). Uso de filtros de carvão ativado granular associado a microrganismos para remoção de fármacos no tratamento de água de abastecimento. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(4), 709 - 720. <https://www.scielo.br/j/esa/a/qShs6gCcN46bLKrnCB9Ljkr/?lang=pt>
- Maleki, M., Moghimi, H., Azin, E. (2022). Biodegradation of thermo-oxidative pretreated low-density polyethylene (LDPE) and polyvinyl chloride (PVC) microplastics by *Achromobacter denitrificans* Ebl13. *Marine Pollution Bulletin*, 181(1), 113830 - 113838. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113830>
- Minh, L., Chinh, N., Giang, L., Le, T., Quyen, D. y Hoang, T. (2018). Prediction of service half-life time of high density polyethylene/organo-modified calcium carbonate composite exposed naturally at Dong Hoi - Quang Binh. *Vietnam Journal of Chemistry*, 56(6), 767 - 772. <https://doi.org/10.1002/vjch.201800085>
- Ministerio del Ambiente, MINAM. (2018). *Menos plástico más vida. Perú limpio*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/11/Afiches-Menos-pl%C3%A1stico-m%C3%A1s-vida.pdf>

- Montazer, Z., Najafi, M. y Levin, D. (2020). *In vitro* degradation of low-density polyethylene by new bacteria from larvae of the greater wax moth, *Galleria mellonella*. *Canadian Journal of Microbiology*, 67(3), 249 - 258. <https://doi.org/10.1139 / cjm-2020-0208>.
- Moreno, D. (2018). *Biotransformación de polietileno de baja densidad (LDPE) y LDPE oxobiodegradable empleando Pleurotus ostreatus y residuos lignocelulósicos de pino (Pinus caribaea)* [tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional PUJ. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/40333>
- Munir, E., Harefa, R., Priyani, N. y Suryanto, D. (2018_a). Plastic degrading fungi *Trichoderma viride* and *Aspergillus nomius* isolated from local landfill soil in Medan. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 126(1), 1 - 7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/126/1/012145>
- Munir, E., Sipayung, F., Priyani, N. y Suryanto, D. (2018_b). Potential of bacteria isolated from landfill soil in degrading low density polyethylene plastic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 126(1), 1 - 7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/126/1/012144>
- Muthumani, S. y Anbuselvi, S. (2014). Waste management and environment protection – A study with isolation and characterisation of low density polyethylene degrading microbes. *International Journal of ChemTech Research*, 7(6), 2841 - 2845 [https://sphinxesai.com/2015/ch_vol7_no6/4/\(2841-2845\)V7N6.pdf](https://sphinxesai.com/2015/ch_vol7_no6/4/(2841-2845)V7N6.pdf)
- Muthukumar, A. y Veerappapillai, S. (2015). Biodegradation of Plastics – A Brief Review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 31(2), 204 - 209. <https://globalresearchonline.net/journalcontents/v31-2/36.pdf>
- Nadeem, H., Alia, K., Muneer, F., Rasul, I., Siddique, M., Azeem, F. y Zubair, M. (2021). Isolation and identification of low-density polyethylene degrading novel bacterial strains. *Archives of Microbiology*, 203(1), 5417 – 5423. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02521-1>
- Ndahebwa, C., Makonde, H., Magoma, G. y Imbuga, M. (2018). Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *Public Library of Science one*, 13(7), 1 - 17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

- Ojha, N., Pradhan, N., Singh, S., Barla, A., Shrivastava, A., Khatua, P., Rai, V. y Bose, S. (2017). Evaluation of HDPE and LDPE degradation by fungus, implemented by statistical optimization. *Scientific Reports*, 7 (39515), 1 - 13. <https://doi.org/10.1038/srep39515>
- Olagoke, I., Ezekiel, O. y Ifeoma, B. (2019). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by certain indigenous bacteria and fungi. *International Journal of Environmental Studies*, 76(6), 1 - 14 <https://doi.org/10.1080/00207233.2019.1579586>
- GREENPEACE. (2016). *Plásticos en los océanos. Datos, comparativas e impactos*. Organización no Gubernamental. https://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos_en_los_oceanos_LR.pdf
- Page, M., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E., Brennan, S., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M., Li, T., Loder, E., Mayo, E., McDonald, S., McGuinness, L., Stewart, L., Thomas, J., Tricco, A., Welch, V., Whiting, P. y Moher, D. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790 - 799. <https://www.prisma-statement.org/documents/Page%20PRISMA%202020%20Spanish.pdf>
- Paul, M. y Kumar, S. (2015). An approach to low-density polyethylene biodegradation by *Bacillus amyloliquefaciens*. *Biotechnology*, 5(1), 81 - 86. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0205-1>
- Pérez, J., Viguera, S., Gómez, O. y Calva, G. (2015). Degradación microbiana con BFNA de hidrocarburos aromáticos por bioaugmentación en Biopilas. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 46(1), 416 - 423. <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181259521017.pdf>
- Perera, P., Deraniyagala, A., Mahawaththage, M., Herath, H., Rajapakse, C., Wijesinghe, P. y Attanayake, R. (2021). Decaying Hardwood Associated Fungi Showing Signatures of Polyethylene Degradation. *BIORESOURCES*, 16(4), 7056 - 7070. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.4.7056-7070>
- Plastics Europe, PE. (2019). *Plastics – the Facts 2019*. https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf
- Plastics Europe, PE. (2021). *Plastics-the facts 2021*. <https://plasticseurope.org/wp->

content/uploads/2021/12/Plastics-the-Facts-2021-web-final.pdf

- Plastics Europe, PE. (2017). *Plásticos – Situación en 2017. Un análisis de los datos sobre producción, demanda y residuos de plásticos en Europa*.
https://www.plasticseurope.org/download_file/force/1452/632
- Portella, K. (2019). *Determinación de la capacidad degradativa de plásticos por cinco especies de hongos del botadero Muyuna* [tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://portal.unas.edu.pe/ppp-trabajos-de-investigacion-ambiental>
- Posada, B. (2012). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, 30(94), 67 - 86.
<https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>
- Pramila, R. y Vijaya, K. (2011a). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by fungi isolated from municipal landfill area. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research*, 1(4), 131 - 136.
https://www.researchgate.net/publication/285096408_Biodegradation_of_low_density_polyethylene_LDPE_by_fungi_isolated_from_municipal_landfill_area
- Pramila, R. y Vijaya, R. (2011b). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by fungi isolated from marine water– a SEM analysis. *African Journal of Microbiology Research*, 5(28), 5013 - 5018.
http://www.academicjournals.org/app/webroot/article/article1380540274_Pramila%20and%20Ramesh.pdf
- Pramila, R. y Vijaya, R. (2015). Potential biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by *Acinetobacter baumannii*. *African Journal of Bacteriology Research*, 7(3), 24 - 28.
<https://academicjournals.org/journal/JBR/article-full-text-pdf/278D96951714>
- Pramila, R., Padmavathy, K., Vijaya, R. y Mahalakshmi, K. (2012). *Brevibacillus parabrevis*, *Acinetobacter baumannii* and *Pseudomonas citronellolis* - Potential candidates for biodegradation of low density polyethylene (LDPE). *Journal of Bacteriology Kyaw Research*, 4(1), 9 - 14. <https://academicjournals.org/journal/JBR/article-abstract/1C2B36E9857>

- Quinchía, A. y Maya, S. (2015). Degradabilidad de polietileno de baja densidad –LDPE- utilizando *Pycnoporus sanguineus* UTCH 03. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, 11(1), 1 - 9. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/1153/1156>
- Rajandas, H., Parimannan, S., Sathasivam, K., Ravichandran, M. y Lee, S. (2012). A novel FTIR-ATR spectroscopy based technique for the estimation of low-density polyethylene biodegradation. *Polymer Testing*, 31(8), 1094 - 1099. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.07.015>
- Ren, L., Men, L., Zhang, Z., Guan, F., Tian, J., Wang, J., Zhang, Y. y Zhang, W. (2019). Biodegradation of Polyethylene by *Enterobacter* sp. D1 from the Guts of Wax Moth *Galleria mellonella*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(11), 1941 - 1953. <https://doi.org/10.3390/ijerph16111941>
- Sáenz, M., Borodulina, T., Diaz, L. y Banchon, C. (2019). Minimal Conditions to Degrade Low Density Polyethylene by *Aspergillus terreus* and *niger*. *Journal of Ecological Engineering*, 20(6), 44 - 51. <https://doi.org/10.12911/22998993/108699>
- Saira, A., Maroof, L., Iqbal, M., Farman, S., Lubna y Faisa, S. (2022). Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) Bags by Fungi Isolated from Waste Disposal Soil. *Applied and Environmental Soil Science*, 32(1), 1 - 7. <https://doi.org/10.1155/2022/8286344>
- Samanta, S., Datta, D. y Halder, G. (2020). Biodegradation efficacy of soil inherent novel sp. *Bacillus tropicus* (MK318648) onto low density polyethylene matrix. *Journal of Polymer Research*, 27(324), 1 - 16. <http://dx.doi.org/10.1007/s10965-020-02296-x>
- Sarker, R., Chakraborty, P., Paul, P., Chatterjee, A. y Tribedi, P. (2020). Degradation of low-density poly ethylene (LDPE) by *Enterobacter cloacae* AKS7: a potential step towards sustainable environmental remediation. *Archives of Microbiology*, 202(8), 2117 – 2125. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01926-8>
- Sen, S. y Raut, S. (2015). Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 462 - 473. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.01.003>
- Skariyachan, S., Setlur, A., Naik, S., Naik, A., Usharani, M. y Vasist, K. (2017). Enhanced biodegradation of low and high-density polyethylene by novel bacterial consortia

- formulated from plastic-contaminated cow dung under thermophilic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9), 8443 - 8457. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8537-0>
- Skariyachan, S., Taskeen, N., Kishore, A., Krishna, B. y Naidu, G. (2021). Novel consortia of Enterobacter and Pseudomonas formulated from cow dung exhibited enhanced biodegradation of polyethylene and polypropylene. *Journal of Environmental Management*, 284(1), 1 - 12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112030>
- Soleimani, Z., Gharavi, S., Soudi, M. y Moosavi, Z. (2021). A survey of intact low-density polyethylene film biodegradation by terrestrial Actinobacterial species. *International Microbiology*, 24(1), 65 - 73. <https://doi.org/10.1007 / s10123-020-00142-0>
- Streit, M., Cimadevila, M. y Trettnak, W. (2020). *Mare Plasticum-The Plastic Sea. Combatting Plastic Pollution Through Science and Art*. ARSCIENCIA. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38945-1>
- Thamizhmarai, T. y Kannahi, M. (2018). Biodegradation of low density polyethylene by *Aspergillus* sp. and *Pseudomonas* sp. isolated from plastic dumped site — A SEM analysis. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 50(1), 182 - 187. <https://globalresearchonline.net/journalcontents/v50-1/26.pdf>
- Thilagavathi, S., Gomathi, V. y Kumar, K. (2018). An approach to Low density polyethylene (LDPE) biodegradation by *Xylaria* sp. from termite garden. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(2), 2408 - 2411. <https://www.phytojournal.com/archives/2018/vol7issue2/PartAH/7-2-52-668.pdf>
- Tribedi, P. y Sil, A. (2013). Low-density polyethylene degradation by *Pseudomonas* sp. AKS2 biofilm. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(6), 4146 - 4153. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1378-y>
- Uribe, D., Giraldo, D., Gutiérrez, S. y 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. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rpb/v17n1/a17v17n1.pdf>

- Wang, R., Neoh, K., Shi, Z., Kang, E., Tambyah, P. y Chiong, E. (2012). Inhibition of *Escherichia coli* and *Proteus mirabilis* adhesion and biofilm formation on medical grade silicone surface. *Biotechnology and Bioengineering*, 109(2), 336 - 345.
<https://doi.org/10.1002/bit.23342>
- Waqas, M., Haris, M., Asim, N., Islam, H., Abdullah, A., Khan, A., Khattak, H., Waqas, M. y Ali, S. (2021). Biodegradable Potential of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus safensis* using low density polyethylene thermoplastic (LDPE) substrate. *European Journal of Environment and Public Health*, 5(2), 1 - 4.
<https://www.ejeph.com/download/biodegradable-potential-of-bacillus-amyloliquefaciens-and-bacillus-safensis-using-low-density-9370.pdf>
- Yeong, S. y Gyun, C. (2019). Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere*, 222(1), 527 - 533.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519301754>

IX. ANEXOS

Anexo 1

Metodología del aislamiento de los microorganismos degradadores del polietileno de baja densidad y métodos de detección y cuantificación utilizados en América y Asia, 2010-2022

Año	Lugar	Referencia	Lugar de aislamiento	Microorganismo	Métodos de detección y cuantificación
2010	América	Uribe et al. (2010)	LDPE de relleno sanitario	<i>Pseudomonas</i> sp. MP3a., MP3b., <i>Penicillium</i> sp., <i>Rhodotorula</i> sp., <i>Hyalodendrun</i> sp.	Gravimetría, FTIR
2015	América	Quinchía y Maya (2015)	CI	<i>Pycnoporus sanguineus</i> UTCH03	Gravimetría, FTIR, SEM, DSC
2019	América	Sáenz et al. (2019)	Manglar (Isla Santay Ecuador)	<i>A. terreus</i> , <i>A. niger</i>	Gravimetría, SEM
2019	América	Bardají et al. (2019)	Vertedero e incinerador de residuos sólidos	<i>Paenibacillus</i> sp.	Gravimetría, FTIR, SEM
2020	América	Montazer et al. (2020)	Larvas	<i>Cupriavidus necator</i> H16, <i>P. putida</i> LS46, <i>P. putida</i> IRN22, <i>Lysinibacillus fusiformis</i> , <i>Bacillus aryabhattai</i>	Gravimetría, GC-FID
2020	América	Butrón (2020)	LDPE de botadero	<i>P. aeruginosa</i>	Gravimetría, microscopía óptica y de fluorescencia
2012	Asia	Kyaw et al. (2012)	CI	<i>P. aeruginosa</i> PAO1 (ATCC 15729), <i>P. aeruginosa</i> (ATCC 15692), <i>P. putida</i> (KT2440 ATCC 47054), <i>P. syringae</i> (DC3000 ATCC 10862)	Gravimetría, FTIR-ATR, SEM, GC-MS, Resistencia a la tracción
2013	Asia	Tribedi y Sil (2013)	Suelo de vertedero de residuos sólidos	<i>Pseudomonas</i> sp. AKS2	Gravimetría, SEM, AFM, Resistencia a la tracción
2014	Asia	Bhatia et al. (2014)	Suelo de relleno sanitario	<i>P. citronellolis</i> EMBS027	Gravimetría, FTIR, SEM, TGA
2014	Asia	Muthumani y Anbuselvi (2014)	Basura de polietileno	<i>Streptococcus</i> sp., <i>E. coli</i> , <i>Klebsella</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp. <i>Saccharomyces</i> sp., <i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> , <i>Streptomyces</i> sp.	Gravimetría, Microscopía óptica
2014	Asia	Das y Kumar (2014)	Suelo de residuos sólidos	<i>Aspergillus</i> sp. (FSM-3, 5, 6, 8), <i>Fusarium</i> sp. (FSM-10)	Gravimetría, FTIR, SEM, Microscopía óptica
2015	Asia	Duddu et al. (2015)	NM	<i>Streptomyces coelicoflavus</i> nbrc 15399	Gravimetría, FTIR, microscopía óptica, BATH
2015	Asia	Das y Kumar (2015)	CI	<i>B. amyloliquefaciens</i> (BSM-1 y BSM-2)	Gravimetría, FTIR, SEM, STURM

Continúa....

Año	Lugar	Referencia	Lugar de aislamiento	Microorganismo	Métodos de detección y cuantificación
2016	Asia	Gajendiran et al. (2016)	Suelo de relleno sanitario	<i>A. clavatus</i> JASK1	Gravimetría, FTIR, SEM, STURM, AFM,
2016	Asia	Abraham et al. (2016)	Lodo+tierra de jardín	<i>Streptomyces</i> sp., <i>A. nonius</i>	Gravimetría, FTIR, GC-MS, STURM, AFM
2016	Asia	Skariyachan et al. (2016)	basura plástica de zonas rurales y urbanas regiones de Bangalore, India,	<i>Proteus</i> spp., <i>Enterobacter</i> spp., <i>Enterobacter</i> spp., <i>Pseudomonas</i> spp., <i>Pantoea</i> spp.	Gravimetría, GC-FID, SEM, Resistencia a la tracción, FTIR
2017	Asia	Skariyachan et al. (2017)	Suelo de vertederos	<i>P. protegens</i> bt-dsce02, <i>Stenotrophomonas</i> sp. bt-dsce03, <i>B. vallismortis</i> bt-dsce01, <i>Paenibacillus</i> sp. bt-dsce04	Gravimetría, FTIR, SEM, EDS, RMN
2017	Asia	Gajendiran et al. (2017)	Suelo de vertedero	<i>A. versicolor</i>	Gravimetría, FTIR, SEM, STURM, AFM
2017	Asia	Ojha et al. (2017)	Suelo de vertedero	<i>P. oxalicum</i> NS4 (KU559906), <i>P. chrysogenum</i> NS10 (KU559907)	Gravimetría, FTIR, FE-SEM, AFM,
2017	Asia	Awasthi et al. (2017)	NM	<i>Rhizopus oryzae</i>	Gravimetría, SEM, AFM, Resistencia a la tracción
2018	Asia	Munir et al. (2018) _b	Suelo de relleno sanitario	<i>Streptococcus</i> sp. Sp2, <i>Streptobacillus</i> sp. Sp4	Gravimetría, FTIR, SEM
2018	Asia	Munir et al. (2018) _a	Suelo de vertedero	<i>Trichoderma viride</i> , <i>Aspergillus nomius</i>	Gravimetría, Resistencia a la tracción
2018	Asia	Hikmah et al. (2018)	CI	<i>Trichoderma</i> spp. (TL 1), <i>Trichoderma</i> spp. (TL 2), <i>Trichoderma</i> spp. (TL 3)	Gravimetría, SEM, DSC, BATH
2018	Asia	Thamizhmarai y Kannahi (2018)	Suelo de residuos de Vedharaniyam	<i>Pseudomonas</i> sp. <i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> , <i>A. oryzae</i>	Gravimetría, FTIR, SEM
2018	Asia	Jayaprakash y Palempalli (2018)	Bolsas de PE en suelo x 6 meses	<i>A. oryzae</i>	Gravimetría, FTIR, SEM
2019	Asia	Islami et al. (2019)	CI	<i>Thiobacillus</i> sp. K29:AA29p, <i>Clostridium</i> sp.	Gravimetría, FTIR
2019	Asia	De Silva et al. (2019)	Suelo de vertedero	<i>Fusarium</i> sp. PS3, <i>Penicillium</i> sp. Ps2, <i>Aspergillus niger</i>	Gravimetría, FTIR, SEM, Microscopía óptica
2019	Asia	Gupta y Devi (2019)	Suelo adherido a plástico	<i>Bacillus</i> sp. ISJ51, ISJ55 e ISJ57	Gravimetría, FTIR, SEM, BATH

Continúa....

Año	Lugar	Referencia	Lugar de aislamiento	Microorganismo	Métodos de detección y cuantificación
2020	Asia	Gupta y Devi (2020)	CI	<i>P. aeruginosa</i> ISJ14	Gravimetría, FTIR, FE-SEM, BATH,
2020	Asia	Dey et al. (2020)	Residuos de vertederos plásticos	<i>Stenotrophomonas</i> sp. P2, <i>Achromobacter</i> sp. DF22	Gravimetría, FTIR, SEM, AFM, BATH,
2020	Asia	Sarker et al. (2020)	Suelo de agricultura (Bengala Occidental)	<i>Enterobacter cloacae</i> AKS7	Gravimetría, SEM, BATH, Resistencia a la tracción, Microscopía de fluorescencia
2020	Asia	Samanta et al. (2020)	Vertedero del centro de la ciudad Durgapur, India	<i>Bacillus tropicus</i> MK318648	Gravimetría, FTIR, SEM, AFM, Resistencia a la tracción
2021	Asia	Maroof et al. (2021)	Suelo de vertedero	<i>B. siamensis</i> , <i>B. cereus</i> , <i>B. wiedmannii</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>Acinetobacter iwoff</i>	Gravimetría, FTIR, FE-SEM, XRD, Análisis de carbono
2021	Asia	Soleimani et al. (2021)	Suelo de vertederos plásticos	<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T10 (MK719894.1), <i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-Y1(MK719896.1), <i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T5 (MK611552.1) <i>Streptomyces alborgiseolus</i> IR-SGS-T10 (MK719894.1) <i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T2 (MK608841.1) <i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T1 (MK608775.1) <i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-Y3 (MK719897.1) <i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-Y2 (MK719898.1) <i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-K3 (MK608706.1) <i>Streptomyces gancidicus</i> IR-SGS-K2 (MH819728.1) <i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-K1 (MK608363.1), <i>Rhodococcus ruber</i> IR-SGS-T6 (MK611559.1) <i>Rhodococcus ruber</i> IR-SGS-T7 (MK611560.1) <i>Rhodococcus</i> sp. IR-SGS-T11 (MK719895.1); <i>Nocardia</i> sp. IR-SGS-T3 (MK611456.1) <i>Nocardia</i> sp. IR-SGS-T9 (MK719893.1) <i>Nocardia farcinica</i> IR-SGS-T8 (MK719892.1)	Gravimetría, FTIR, SEM, Resistencia a la tracción
2021	Asia	Waqas et al. (2021)	CI	<i>B. safensis</i> , <i>B. amyloliquefaciens</i>	Gravimetría, SEM
2021	Asia	Khruengsai et al. (2021)	Institute of Excellence in Fungal Research	<i>D. italiana</i> , <i>T. jaczewskii</i> , <i>C. fructicola</i> , <i>S. citrulli</i> , <i>A. niger</i>	Gravimetría, FTIR, SEM, GC-MS
2021	Asia	Khandare et al. (2021)	CI	<i>Cobetia</i> sp., <i>Halomonas</i> sp., <i>Exiguobacterium</i> sp., <i>Alcanivorax</i> sp.	Gravimetría, FTIR-ATR, FE-SEM, AFM, TGA

Continúa....

Año	Lugar	Referencia	Lugar de aislamiento	Microorganismo	Métodos de detección y cuantificación
2021	Asia	Nadeem et al. (2021)	vertederos de desechos sólidos	<i>Serratia</i> sp., <i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	Gravimetría, FTIR
2021	Asia	Chaudhary et al. (2021)	CI	<i>Thermomyces lanuginosus</i>	Gravimetría, FTIR, SEM, TGA
2021	Asia	Skariyachan et al. (2021)	Suelo de vertedero	<i>Enterobacter</i> sp. nov. bt DSCE01, <i>Enterobacter cloacae</i> nov. bt DSCE02 y <i>Pseudomonas aeruginosa</i> nov. bt. DSCE-CD03	Gravimetría, FTIR, SEM, AFM, XRD, EDS,
2021	Asia	Perera et al. (2021)	Bosque se reserva seco	<i>Phlebiopsis flavidoalba</i> , <i>Schizophyllum commune</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Gravimetría, FTIR, SEM, Resistencia a la tracción
2022	Asia	Saira et al (2022)	Vertederos del distrito de Peshawar	<i>Aspergillus Niger</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Penicillium</i>	Gravimetría, FTIR
2022	Asia	Maleki et al. (2022)	Compost	<i>Achromobacter denitrificans</i> Ebl13	Gravimetría, STURM FTIR SEM y TGA
2022	Asia	khruengsai et al. 2022	Institute of Excellence in Fungal Research	<i>Neopestalotiopsis phangngaensis</i>	Gravimetría, SEM, STURM, Resistencia ala tracción
2022	Asia	Liu et al. (2022)	Vertedero de residuos domésticos	<i>Bacillus velezensis</i> C5	Gravimetría, FTIR-ATR, SEM, EDS, FE-SEM, HTGPC, GC-MS

Anexo 2

Eficiencia de bacterias degradadoras del polietileno de baja densidad (LDPE) en América y Asia 2010-2022, teniendo en cuenta el tiempo, medio de biodegradación y el porcentaje de peso perdido del plástico

Bacterias	Días	Medio	LDPE	Pérdida de peso (%)
<i>Enterobacter cloacae</i> AKS7	45	Medio basal+ LDPE	5 × 4 cm (30 mg)	9, 00
<i>Pseudomonas</i> spp.	120	MM	5 × 1 cm/gránulos (1, 0 g l ⁻¹)	52, 00/19, 00
<i>Streptomyces</i>	30	MSM, MS	0, 22 - 0, 28 g	40, 00
<i>Achromobacter</i> sp. DF22	100	LBA	0, 3 g	7, 45
<i>Achromobacter denitrificans</i> Ebl13	60	MSM	Láminas	12, 3
<i>Acinetobacter iwoffii</i>	90	MSM	2 x 2 cm	0, 76
<i>Alcanivorax</i> sp.H265	90	MMB Bushnell-Haas	1 x 3 cm	0, 97
<i>Bacillus</i> sp.	30	MSM, MS	0, 22 - 0, 28 g	40, 00
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	30	MSp	1 g	18, 00
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> BSM-1(KC924446)	60	MS	3 g	11, 00
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> BSM-2 (KC924447)	60	MS	3 g	16, 00
<i>Bacillus cereus</i>	90	MSM	2 x 2 cm	6, 33
<i>Bacillus safensis</i>	30	MSp	1 g	18, 60
<i>Bacillus siamensis</i>	90	MSM	2 x 2 cm	8, 46
<i>Bacillus</i> sp. IISJ55	60	PHM	0,1g	1, 50
<i>Bacillus</i> sp. ISJ55	60	Agar y CN	3 × 3 cm	1, 50
<i>Bacillus tropicus</i> MK318648	40	MSM al 1.3%	9 × 3,5 cm	10, 15
<i>Bacillus vallismortis</i> bt-dsce01	120	CMM	5 x 1 cm/bolas	18, 30/17, 30
<i>Bacillus velezensis</i> C5	90	MSM	4 × 4 cm	8, 01
<i>Bacillus wiedmannii</i>	90	MSM	2 x 2 cm	5, 39
<i>Bacillus subtilis</i>	90	MSM	2 x 2 cm	3, 75
<i>Streptobacillus</i> sp.	30	MSMB	1, 5 x 1, 5 cm	12, 06
<i>Cobetia</i> sp. H237	90	MMB Bushnell-Haas	1 x 3 cm	1, 40
<i>Escherichia coli</i>	30	MSM, MS	0, 22 - 0, 28 g	45, 00
<i>Enterobacter</i> spp.	120	MM	5 × 1 cm/gránulos (1, 0 g l ⁻¹)	70, 00/21, 00
<i>Enterobacter</i> spp.	120	MM	5 × 1 cm/gránulos (1, 0 g l ⁻¹)	68, 00/28, 00
<i>Exiguobacterium</i> sp. H256	90	MMB Bushnell-Haas	1 x 3 cm	1, 26
<i>Halomonas</i> sp. H-255	90	MMB Bushnell-Haas	2x 3 cm	1, 72
<i>Klebsiella</i> sp.	30	MSM, MS	0,22-0,28 g	21, 00

Continúa....

Bacterias	Días	Medio	LDPE	Pérdida de peso (%)
<i>Lysinibacillus fusiformis</i>	18	MPE	0,1 g	8, 20
<i>Nocardia</i> sp. IR-SGS-T3 (MK611456.1)	60	MSM	3 x 2 cm	5, 98
<i>Nocardia</i> sp. IR-SGS-T9 (MK719893.1)	60	MSM	3 x 2 cm	3, 98
<i>Nocardia farcinica</i> IR-SGS-T8 (MK719892.1)	60	MSM	3 x 2 cm	3, 60
<i>Paenibacillus</i> sp.	90	MSM (sin tratamiento/ tratamiento químico)	5 cm dd	11, 60/30, 80
<i>Paenibacillus</i> sp.bt-dsce04	120	CMM	5 x 1 cm/gránulos	19, 00/18, 70
<i>Pantoea</i> spp	120	MM	5 x 1 cm/gránulos (1, 0 g l ⁻¹)	64/24
<i>Proteus</i> spp	120	MM	5 x 1 cm/gránulos (1, 0 g l ⁻¹)	59/16
<i>Pseudomonas</i>	30	MSM, MS	0, 22 - 0, 28 g	61, 00
<i>Pseudomonas</i>	60	Agar nutritivo	2 x 2 cm	20, 00
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 15692)	120	MMB	5 x 1 cm	11, 00
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> A	30	CNMM	2 x 2 cm	27, 30
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> B	90	MSM	2 x 2 cm	1, 15
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ISJ14	60	BHM/MSM	0,1 g	8, 70/6, 50
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> PAO1 (ATCC 15729)	120	MMB	5 x 1 cm	20, 00
<i>Pseudomonas citronellolis</i> EMBS027	4	MB	0, 2 g	17, 80
<i>Pseudomonas protegens</i> bt-dsce02	120	CMM	5 x 1 cm/bolas	15, 50/15, 20
<i>Pseudomonas putida</i> (KT2440 ATCC 47054)	120	MMB	5 x 1 cm	9, 00
<i>Pseudomonas</i> sp.	150	MSM	10 mg	21, 00
<i>Pseudomonas</i> sp. AKS2	45	MMB (sin aditivos/Aceite mineral)	300 mg	5, 00 /14, 00
<i>Pseudomonas syringae</i> (DC3000 ATCC 10862)	120	MMB	5 x 1 cm	11, 30
<i>Rhodococcus</i> sp. IR-SGS-T11 (MK719895.1)	60	MSM	3 x 2 cm	4, 98
<i>Rhodococcus ruber</i> IR-SGS-T6 (MK611559.1)	60	MSM	3 x 2 cm	6, 23
<i>Rhodococcus ruber</i> IR-SGS-T7 (MK611560.1)	60	MSM	3 x 2 cm	3, 01
<i>Serratia</i> sp.	150	MSM	10 mg	40, 00
<i>Stenotrophomonas</i> sp.	150	MSM	10 mg	32, 00
<i>Stenotrophomonas</i> sp. bt-dsce03	120	CMM	5 x 1 cm/bolas	19,20/18,50

Continúa....

Bacterias	Días	Medio	LDPE	Pérdida de peso (%)
<i>Stenotrophomonas</i> sp. P2	100	LBA	0, 3 g	7, 54
<i>Streptococcus</i>	30	MSMB	1, 5 x 1, 5 cm	0, 16
<i>Streptomyces coelicoflavus</i> nbrc 15399	28	MMS	0, 05 g	30, 00
<i>Streptomyces</i> sp.	90	CM1	0, 5 g	5, 20
<i>Streptomyces alborgiseolus</i> IR-SGS-T10 (MK719894.1)	60	MSM	3 x 2 cm	9, 50
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T4 (MK611551.1)	60	MSM	3 x 2 cm	6, 50
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T5 (MK611552.1)	60	MSM	3 x 2 cm	5, 31
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-Y1 (MK719896.1)	60	MSM	3 x 2 cm	6, 70
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-K1 (MK608363.1)	60	MSM	3 x 2 cm	3, 40
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T1 (MK608775.1)	60	MSM	3 x 2 cm	4, 20
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-T2 (MK608841.1)	60	MSM	3 x 2 cm	3, 98
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-Y3 (MK719897.1)	60	MSM	3 x 2 cm	3, 64
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-Y2 (MK719898.1)	60	MSM	3 x 2 cm	2, 46
<i>Streptomyces</i> sp. IR-SGS-K3 (MK608706.1)	60	MSM	3 x 2 cm	3, 56
<i>Streptomyces gancidicus</i> IR-SGS-K2 (MH819728.1)	60	MSM	3 x 2 cm	2, 31
<i>Cupriavidus necator</i> H16,	18	MPE	0,1 g	13, 50
<i>Pseudomonas putida</i> LS46,				
<i>Pseudomonas putida</i> IRN22				
<i>Enterobacter</i> sp.nov. bt DSCE01,	160	MMIS+ 2 g LDPE y	3× 3 cm	64, 25
<i>Enterobacter cloacae</i> nov. bt DSCE02 y <i>Pseudomonas aeruginosa</i> nov. bt. DSCE-CD03		PP+ UV		
<i>Enterobacter</i> spp., <i>Pantoea</i> sp.	120	MM	5 × 1 cm/ gránulos (1, 0 g l ⁻¹)	81, 00/38, 00
<i>Pseudomonas protegens</i> ,	120	CMM	5 x 1 cm/bolas	75, 00/55, 00
<i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>Bacillus vallismortis</i> , <i>Paenibacillus</i> sp.				
<i>Pseudomonas</i> spp. (MP3a, MP3b)	60	MSM	20g	5, 40
<i>Thiobacillus</i> sp. K29, <i>Clostridium</i> sp	30	SMSs	10 g ph 7/30 °c	6, 40/5, 30

Nota. LBA=Agar luria bertani, MSMB= Caldo medio de sal mineral, MSM= Medio sal mineral, MSP= Medio suplemento, MPE= Medio basal PE., PHM= Medio de caldo bushnell, CMM= Caldo medio mineral, CNMM= Caldo nutritivo con medio mineral, MMS= medio mineral sintético, SMSs= Solución de sal mineral de piedra, MMB= Medio mineral basal, MS= Medio sintético, CM-2216= Caldo marino, SMB= Caldo mineral sintético, MB= Anexo, ND: No determinado. MMIS=Medio Mínimo de Sal, MM= Medio mínimo

Anexo 3

Eficiencia de hongos degradadores del polietileno de baja densidad (LDPE) en América y Asia 2010-2022, teniendo en cuenta el tiempo, medio de biodegradación y el porcentaje de peso perdido del plástico

Hongos	Días	Medio	LDPE	Pérdida de peso (%)
<i>Schizophyllum commune</i>	60	CzB -Dox	5, 0 × 5, 0 mm	9, 65
<i>Aspergillus clavatus</i> JASK1	90	M1	0, 5 g	35, 00
<i>Aspergillus fавus</i>	120/270	MSM +polvo 3%/suelo	PE 4 x 3 cm	14, 30/30, 60
<i>Aspergillus flavus</i>	60	MSM	2 x 2 cm	16, 10
<i>Aspergillus flavus</i>	60	CN	2 × 2 cm	31, 20
<i>Aspergillus flavus</i>	30	MSM, MS	0, 22 - 0, 28 g	11, 00
<i>Aspergillus niger</i>	60	MSM	2 x 2 cm	22, 90
<i>Aspergillus Niger</i>	90	MSM	1 x 4 cm	28, 78
<i>Aspergillus niger</i>	60	CN	2 × 2 cm	30, 00
<i>Aspergillus niger</i>	30	MSM, MS	0, 22 - 0, 28 g	72, 00
<i>Aspergillus niger</i>	77	CzA	2 x 2 cm	35, 30
<i>Aspergillus nomius</i>	90	AGSC	0, 5 g	4, 90
<i>Aspergillus nomius</i>	45	MSMA+glucosa	1 x 4 cm	6, 63
<i>Aspergillus oryzae</i>	90	PDB/CzB (etanol/ pálmico)	A. 2 cm dd	(25, 00/32, 50) / (30, 00/40, 00)
<i>Aspergillus oryzae</i>	60	CN	2 × 2 cm	26, 10
<i>Aspergillus</i> sp. (FSM-3)	60	MSM	1, 5 × 1, 5 cm	8, 00
<i>Aspergillus</i> sp. (FSM-5)	60	MSM	1, 5 × 1, 5 cm	5, 00
<i>Aspergillus</i> sp. (FSM-6)	60	MSM	1, 5×1, 5 cm	7, 00
<i>Aspergillus</i> sp. (FSM-8)	60	MSM	1, 5×1, 5 cm	7, 00
<i>Aspergillus terreus</i>	270	MSM +polvo 3%/suelo	PE 4 x 3 cm	13, 10/11, 40
<i>Aspergillus terreus</i>	77	CzA	2 x 2 cm	22, 14
<i>Aspergillus versicolor</i>	30	M1	0, 5 g	40, 60
<i>Colletotrichum fructicola</i>	90	MSM	1 x 4 cm	48, 78
<i>Diaporthe italiana</i>	90	MSM	1 x 4 cm	43, 90
<i>Fusarium</i> kc-2010	90	PDA	3, 5 x 3, 5 cm	0, 59
<i>Fusarium</i> sp. (FSM-10)	60	MSM	1, 5 × 1, 5 cm	9, 00
<i>Neopestalotiopsis phangngaensis</i>	90	MSM	1 x 4 cm	54, 34
<i>Penicillium chrysogenum</i> NS10 (KU559907)	90	CzB	6 x 6 cm	36, 60
<i>Penicillium oxalicum</i> NS4 (KU559906)	90	CzB	6 x 6 cm	34, 35
<i>Penicillium</i> sp.	90	PDA	3, 5 x 3, 5 cm	0, 35
<i>Penicillium</i> sp. x9	90	PDA)	3, 5 x 3, 5 cm	0, 36

Continúa....

Hongos	Días	Medio	LDPE	Pérdida de peso (%)
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	60	CzB -Dox	5, 0 × 5, 0 mm	2, 50
<i>Phlebiopsis flavidoalba</i>	60	CzB -Dox	5, 0 × 5, 0 mm	2, 60
<i>Pycnoporus sanguineus</i> UTCH03	180	Sorgo (33%)	5 x 5 cm (67%)	0, 66
<i>Rhizopus oryzae</i>	30	CPD	10 x 4, 5 cm	8, 40
<i>Saccharomyces</i> sp.	30	MSM, MS	0, 22 - 0, 28 g	43, 00
<i>Stagonosporopsis citrulli</i>	90	MSM	1 x 4 cm	45, 12
<i>Thermomyces lanuginosus</i>	30	MSM+UV	4 × 4 cm	9, 21
<i>Thyrostroma jaczewskii</i>	90	MSM	1 x 4 cm	46, 34
<i>Trichoderma</i> spp.	35	MSM	1 x 3 cm	4, 87
<i>Trichoderma</i> spp.	35	MSM	1 x 3 cm	7, 12
<i>Trichoderma</i> spp.	35	MSM	1 x 3 cm	7, 51
<i>Trichoderma viride</i>	45	MSMA+glucosa	1 x 4 cm	5, 13
<i>Penicillium</i> sp., <i>Rhodotorula</i> sp., <i>Hyalodendron</i> sp.	60	MSM	20 g	4, 80
<i>Lysinibacillus xylanilyticus</i> , <i>Aspergillus niger</i>	126	MMS	UV/sinUV	29, 50/15, 80
<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus</i> <i>flavus</i> , <i>Aspergillus oryzae</i>	55	PDB	2 x 2 cm	26, 15

Nota. MSM= Medio sal mineral, CzA= Agar czapek, AGSC= Caldo sal de arginina glicerol, MSMA= Agar medio de sal mineral, PDA= Agar papa dextrosa, CzB= Caldo czapek, CPD= Caldo papa dextrosa, MMS= Medio mineral sintético, SM= Medio sintético, UV= Radiación ultravioleta, MD =Anexo, M1= Anexo, ND=No determinado, PDB= Caldo papa dextrosa. CN=Caldo Nutritivo.