



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE MICROBIOLOGÍA Y
PARASITOLOGÍA



**Eficiencia de insectos y microorganismos asociados
degradadores de poliestireno identificados en América,
Asia y Europa, 2015-2021**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADA EN BIOLOGÍA
MICROBIOLOGÍA - PARASITOLOGÍA

PRESENTADA POR:

Bach. Clotilde Ventura Bernilla

Bach. Julissa Elizabeth Zeña Quesquén

ASESORA

Dra. Carmen Carreño Farfán

CO-ASESORA

Dra. Carmen Patricia Calderón Arias

LAMBAYEQUE- PERÚ

2024

**Eficiencia de insectos y microorganismos asociados
degradadores de poliestireno identificados en América, Asia y
Europa, 2015-2021**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADA
EN BIOLOGÍA – MICROBIOLOGÍA – PARASITOLOGÍA

APROBADA POR:

Dra. Carmen Patricia Calderón Arias



PRESIDENTE

Dr. Alberto Díaz Zapata



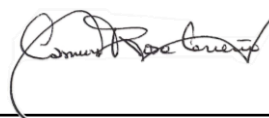
SECRETARIO

Lic. Julio César Silva Estela



VOCAL

Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán



ASESORA

LAMBAYEQUE, PERÚ

2024

Eficiencia de insectos y microorganismos asociados degradadores de poliestireno identificados en América, Asia y Europa, 2015–2021

INFORME DE ORIGINALIDAD

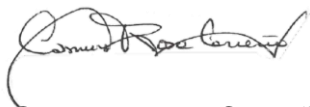
16%	11%	12%	10%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Andressa F. Pivato, Gabriela M. Miranda, Janira Prichula, Jeane E.A. Lima et al. "Hydrocarbon-based plastics: Progress and perspectives on consumption and biodegradation by insect larvae", Chemosphere, 2022 Publicación	1%
2	www.scienceopen.com Fuente de Internet	1%
3	pure.au.dk Fuente de Internet	1%
4	Justyna Rybak, Agnieszka Stojanowska, Farhad Zeynalli. "Biodegradability and bioremediation of polystyrene-based pollutants", Elsevier BV, 2023 Publicación	1%
5	ouci.dntb.gov.ua Fuente de Internet	1%



Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

6	link.springer.com Fuente de Internet	1 %
7	Submitted to Olivet Nazarene University Trabajo del estudiante	< 1 %
8	www.biorxiv.org Fuente de Internet	< 1 %
9	public.pensoft.net Fuente de Internet	< 1 %
10	www.researchsquare.com Fuente de Internet	< 1 %
11	Juan C. Sanchez–Hernandez. "A toxicological perspective of plastic biodegradation by insect larvae", Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2021 Publicación	< 1 %
12	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	< 1 %
13	www.frontiersin.org Fuente de Internet	< 1 %
	 Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán	
14	C. Otero, C. Arredondo, A. Echeverría–Vega, F. Gordillo–Fuenzalida. " spp. mycotoxins found in food and feed and their health effects ", World Mycotoxin Journal, 2020 Publicación	< 1 %

15

Submitted to Nottingham Trent University

Trabajo del estudiante

< 1 %

16

repositorio.ual.es

Fuente de Internet

< 1 %

17

Claudio Cucini, Rebecca Funari, David Mercati, Francesco Nardi, Antonio Carapelli, Laura Marri. "Polystyrene shaping effect on the enriched bacterial community from the plastic-eating *Alphitobius diaperinus* (Insecta: Coleoptera)", *Symbiosis*, 2022

Publicación

< 1 %

18

N.S. Johnsen, J.L. Andersen, J. Offenberg. "The effect of relative humidity on the survival and growth rate of the yellow mealworm larvae (, Linnaeus 1758) ", *Journal of Insects as Food and Feed*, 2021

Publicación

< 1 %

19

repositorio.unaj.edu.pe

Fuente de Internet

< 1 %

20

zenodo.org

Fuente de Internet

< 1 %

21

repositori.irta.cat

Fuente de Internet

< 1 %

22

phys.org

Fuente de Internet

< 1 %



Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

Submitted to Curtin University of Technology

23

Trabajo del estudiante

< 1 %

24

Submitted to Eastern Michigan University

Trabajo del estudiante

< 1 %

25

Natalija Topić Popović, Snježana Kazazić, Branka Bilić, Sanja Babić et al. "Shewanella spp. from wastewater treatment plant-affected environment: isolation and characterization", Environmental Science and Pollution Research, 2022

Publicación

< 1 %

26

digitalcommons.usf.edu

Fuente de Internet

< 1 %

27

Mulatu Wakgari, Gebissa Yigezu. "Honeybee keeping constraints and future prospects", Cogent Food & Agriculture, 2021

Publicación

< 1 %

28

Peng Liu, Yanqi Shi, Xiaowei Wu, Hanyu Wang, Hexinyue Huang, Xuetao Guo, Shixiang Gao. "Review of the artificially-accelerated aging technology and ecological risk of microplastics", Science of The Total Environment, 2021


Publicación

< 1 %

29

pub.epsilon.slu.se

Fuente de Internet



Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

< 1 %

30 Xiang Ma, Chang-Lin Zhao. "Crepatura ellipsospora gen. et sp. nov. in Phanerochaetaceae (Polyporales, Basidiomycota) bearing a tuberculate hymenial surface", Mycological Progress, 2019
Publicación < 1 %

31 gredos.usal.es
Fuente de Internet < 1 %

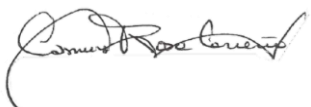
32 repositorio.ucv.edu.pe
Fuente de Internet < 1 %

33 sites.google.com
Fuente de Internet < 1 %

34 "Theranostics Approaches to Gastric and Colon Cancer", Springer Science and Business Media LLC, 2020
Publicación < 1 %

35 atrium.lib.uoguelph.ca
Fuente de Internet < 1 %

36 Lei Xie, Dezhi Zuo, Yushen Ma, Xiang Zhu et al. "Salinity fluctuations in a brackish-water lake influence the dissolved organic matter characteristics of pore water", Research Square Platform LLC, 2022
Publicación < 1 %


Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

37 Michael D. Pointer, Matthew J. G. Gage, Lewis G. Spurgin. "Tribolium beetles as a model < 1 %

system in evolution and ecology", Heredity, 2021

Publicación

-
- 38 neuro.unboundmedicine.com < 1 %
Fuente de Internet
-
- 39 theses.hal.science < 1 %
Fuente de Internet
-
- 40 erepo.uef.fi < 1 %
Fuente de Internet
-
- 41 friendsofsaguaro.org < 1 %
Fuente de Internet
-
- 42 Submitted to Macquarie University < 1 %
Trabajo del estudiante
-
- 43 Michael Maes, Asara Vasupanrajit, Ketsupar Jirakran, Pavit Klomkiew et al. "Adverse childhood trauma and reoccurrence of illness impact the gut microbiome, which affects suicidal behaviors and the phenome of major depression: towards enterotypic-phenotypes", Cold Spring Harbor Laboratory, 2023 < 1 %
Publicación
-
- 44 Submitted to La Trobe University < 1 %
Trabajo del estudiante
-
- 45 Submitted to Texas State University- San Marcos < 1 %
Trabajo del estudiante



Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

46	R. Lavalle, E. Condominas, JM Haro, I. Giné-Vázquez et al. "The impact of COVID-19 lockdown on a cohort of adults with recurrent major depressive disorder from Catalonia: a decentralized longitudinal study using remote measurement technology", Cold Spring Harbor Laboratory, 2023 Publicación	< 1 %
47	www.aulavirtualusmp.pe Fuente de Internet	< 1 %
48	Anton Bankevich, Sergey Nurk, Dmitry Antipov, Alexey A. Gurevich et al. "SPAdes: A New Genome Assembly Algorithm and Its Applications to Single-Cell Sequencing", Journal of Computational Biology, 2012 Publicación	< 1 %
49	Submitted to Sheffield Hallam University Trabajo del estudiante	< 1 %
50	repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet	< 1 %
51	"Lactic Acid Bacteria", Wiley, 2014 Publicación	< 1 %
52	coek.info Fuente de Internet	< 1 %
53	revia.areandina.edu.co Fuente de Internet	< 1 %

Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

54 www.ria.ie < 1 %
Fuente de Internet

55 Submitted to University of Wales, Bangor < 1 %
Trabajo del estudiante

56 omnh.repo.nii.ac.jp < 1 %
Fuente de Internet

57 researchspace.auckland.ac.nz < 1 %
Fuente de Internet

58 Submitted to University of Nebraska at Kearney < 1 %
Trabajo del estudiante


59 repository.ucatolicaluisamigo.edu.co < 1 %
Fuente de Internet

60 wjgnet.com < 1 %
Fuente de Internet

61 S. Opisa, H. du Plessis, K. S. Akutse, K. K. M. Fiaboe, S. Ekesi. " Effects of Entomopathogenic fungi and -based biopesticides on (Lepidoptera: Crambidae) ", Journal of Applied Entomology, 2018 < 1 %
Publicación

62 Submitted to Southern New Hampshire University – Continuing Education < 1 %
Trabajo del estudiante

63 eartharxiv.org
Fuente de Internet


Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

< 1 %

64

peerj.com

Fuente de Internet

< 1 %

65

Bo Yao, Rong Huang, Zhenfen Zhang, Shangli Shi. "Seed-Borne *Erwinia persicina* Affects the Growth and Physiology of Alfalfa (*Medicago sativa* L.)", *Frontiers in Microbiology*, 2022

Publicación

< 1 %

66

Khemmapas Treesuwan, Wannee Jirapakkul, Sasitorn Tongchitpakdee, Vanee Chonhenchob, Warapa Mahakarnchanakul, Kullanart Tongkhao. "Sulfite-free treatment combined with modified atmosphere packaging to extend trimmed young coconut shelf life during cold storage", *Food Control*, 2022

Publicación

< 1 %

67

Patrice Bouchard, Yves Bousquet, Rolf L. Aalbu, Miguel A. Alonso-Zarazaga, Ottó Merkl, Anthony E. Davies. "Review of genus-group names in the family Tenebrionidae (Insecta, Coleoptera)", *ZooKeys*, 2021

Publicación

< 1 %



Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

68

R. Denaro, F. Aulenta, F. Crisafi, F. Di Pippo et al. "Marine hydrocarbon-degrading bacteria

< 1 %

breakdown poly(ethylene terephthalate)
(PET)", Science of The Total Environment, 2020

Publicación

- 69 Rosa Icela Robles Montoya, Fannie Isela Parra Cota, Sergio de los Santos Villalobos. "Draft genome sequence of *Bacillus megaterium* TRQ8, a plant growth-promoting bacterium isolated from wheat (*Triticum turgidum* subsp. *durum*) rhizosphere in the Yaqui Valley, Mexico", 3 Biotech, 2019 < 1 %

Publicación

- 70 Yu Yang, Jialei Wang, Mengli Xia. "Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating superworms *Zophobas atratus*", Science of The Total Environment, 2020 < 1 %

Publicación

- 71 Ostin Garcés-Ordóñez, Juan F. Saldarriaga-Vélez, Luisa F. Espinosa-Díaz, Miquel Canals, Anna Sánchez-Vidal, Martin Thiel. "A systematic review on microplastic pollution in water, sediments, and organisms from 50 coastal lagoons across the globe", Environmental Pollution, 2022 < 1 %

Publicación

Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

- 72 Zuhayra Nasrin Ahmad Shukri, Che Engku Noramalina Che Engku Chik, Shahadat Hossain, Rohisyamuddin Othman et al. "A < 1 %

novel study on the effectiveness of
biofloculant-producing bacteria *Bacillus
enclensis*, isolated from biofloc-based system
as a biodegrader in microplastic pollution",
Chemosphere, 2022

Publicación

73

bmcrenotes.biomedcentral.com

Fuente de Internet

< 1 %

74

revistapolimeros.org.br

Fuente de Internet

< 1 %

75

www.mdpi.com

Fuente de Internet

< 1 %

76

besjournals.onlinelibrary.wiley.com

Fuente de Internet

< 1 %

77

en.wikipedia.org

Fuente de Internet

< 1 %

78

osjournal.org

Fuente de Internet

< 1 %

79

Belgin Şeker Hirçin, Hüseyin Yörür, Fatih
Mengeloğlu. "Effects of filler type and content
on the mechanical, morphological, and
thermal properties of waste casting
polyamide 6 (W-PA6G)-based wood plastic
composites", *BioResources*, 2020

Publicación

< 1 %


Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

80 Shuai Wang, Wei Shi, Zhichu Huang, Nihong Zhou, Yanling Xie, Yu Tang, Fuliang Hu, Guangxu Liu, Huoqing Zheng. "Complete digestion/biodegradation of polystyrene microplastics by greater wax moth (*Galleria mellonella*) larvae: direct in vivo evidence, gut microbiota independence, and potential metabolic pathways", *Journal of Hazardous Materials*, 2021

Publicación

81 Submitted to State University of New York , Geneseo

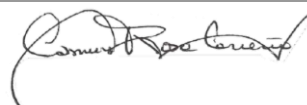
Trabajo del estudiante

82 Ya-Nan Zhao, Karen K. Nakasone, Che-Chi Chen, Shi-Liang Liu, Yi-Feng Cao, Shuang-Hui He. "A Contribution to the Phylogeny and Taxonomy of *Phlebiopsis* (Polyporales, Basidiomycota)", *Research Square*, 2020

Publicación

83 www.uni-kiel.de

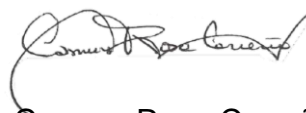
Fuente de Internet



Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

84 Anlui Rodríguez-Carreón, Yuridia Ortiz-Rivera, Claudia Carolina Hernández-Peña, Coyoлахuqui Figueroa. "Biodegradación de espumas plásticas por larvas de insectos: ¿una estrategia sustentable?", *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 2021

85	biblio.ugent.be Fuente de Internet	< 1 %
86	Submitted to University of Warwick Trabajo del estudiante	< 1 %
87	estudogeral.sib.uc.pt Fuente de Internet	< 1 %
88	www.codai.ufrpe.br Fuente de Internet	< 1 %
89	www.thepab.org Fuente de Internet	< 1 %
90	Submitted to University of Southern Queensland Trabajo del estudiante	< 1 %
91	lirias2repo.kuleuven.be Fuente de Internet	< 1 %
92	www.arxiv-vanity.com Fuente de Internet	< 1 %
93	researchspace.ukzn.ac.za Fuente de Internet	< 1 %



Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

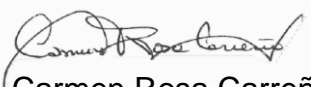
Apagado

Excluir bibliografía

Apagado



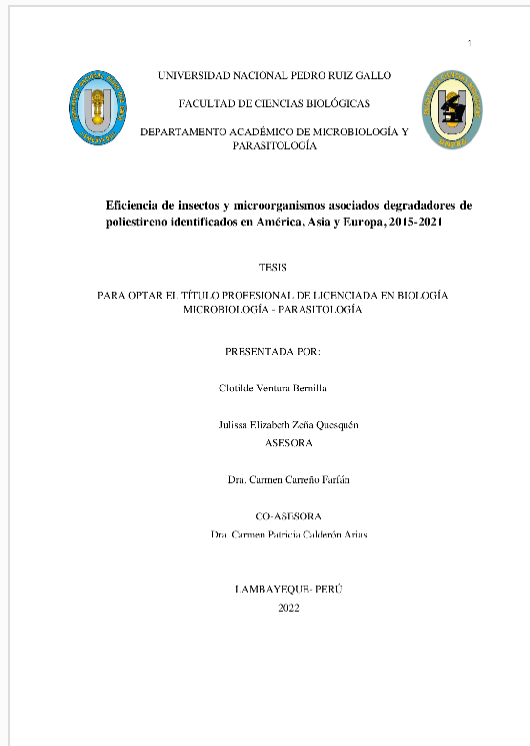
Recibo digital


Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

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:	Clotilde Ventura Bernilla Julissa Elizabeth Zeña Quesquén
Título del ejercicio:	Tesis pregrado
Título de la entrega:	Eficiencia de insectos y microorganismos asociados degrada...
Nombre del archivo:	ara_turnitin_27_de_enero_INFORME_Poliestireno_ENERO_202...
Tamaño del archivo:	4.9M
Total páginas:	92
Total de palabras:	20,057
Total de caracteres:	121,687
Fecha de entrega:	02-feb.-2023 11:58a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre...	2004867671

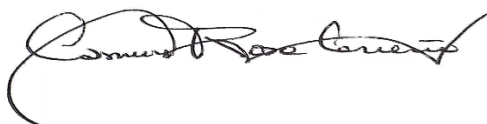


CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo, Carmen Rosa Carreño Farfán, Asesor de Tesis de las bachilleres Clotilde Ventura Bernilla y Julissa Elizabeth Zeña Quesquén, Titulada: Eficiencia de insectos y microorganismos asociados degradadores de poliestireno identificados en América, Asia y Europa, 2015-2021 luego de la revisión exhaustiva del documento constato que la misma tiene un índice de similitud de 16 % verificable en el reporte de similitud del programa Turnitin.

La suscrita 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, 2 de febrero de 2023



Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán
DNI:16494424
ASESOR



ACTA DE SUSTENTACIÓN
ACTA DE SUSTENTACION N° 013-2024-FCCBB-UI



Siendo las 11:30 horas del día 08 de febrero de 2024, se reunieron los Miembros del Jurado evaluador de la tesis titulada **Eficiencia de insectos y microorganismos asociados degradadores de poliestireno identificados en América, Asia y Europa, 2015-2021** con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

Dra. Carmen Patricia Calderón Arias
Dr. Alberto Díaz Zapata
Lic. Julio César Silva Estela
Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

Presidenta
Secretario
Vocal
Asesora

Acto de sustentación fue autorizado por Resolución N° 034-2024-FCCBB/D, de fecha 06 de febrero de 2024


La Tesis presentada y sustentada por la Bachiller **CLOTILDE VENTURA BERNILLA** y la Bachiller **JULISSA ELIZABETH ZEÑA QUESQUÉN** 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**) (19.00) en la escala vigesimal.


Por lo que la Bachiller **CLOTILDE VENTURA BERNILLA** y la Bachiller **JULISSA ELIZABETH ZEÑA QUESQUÉN** 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 13:00 se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

Firman:


Dra. Carmen Patricia Calderón Arias,
Presidenta


Dr. Alberto Díaz Zapata
Secretario


Lic. Julio César Silva Estela
Vocal


Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán
Asesora

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	11
II.	MARCO TEÓRICO.....	14
2.1	Antecedentes de la investigación	14
2.1.1	Insectos degradadores de poliestireno.....	14
2.1.2	Microorganismos asociados a insectos degradadores de poliestireno....	15
2.2	Bases teóricas.....	16
2.3	Definición de términos básicos.....	19
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1	Materiales.....	24
3.2	Población y muestra	24
3.3	Métodos.....	24
3.3.1	Variables cualitativas.....	24
3.3.2	Tipo de estudio y técnica.....	24
3.3.3	Procedimiento.....	25
3.3.4	Instrumentos.....	26
3.3.5	Aspectos éticos.....	26
3.3.6	Procesamiento y análisis de datos.....	26
IV.	RESULTADOS.....	28
4.1	Revisión sistemática de los artículos científicos sobre la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados publicados durante 2015-2021.....	28
4.2	Características taxonómicas y morfológicas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	28
4.2.1	Características taxonómicas de los insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	31
4.2.2	Características morfológicas de los insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	38
4.3	Características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos asociados a los insectos degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	44

4.3.1	Características taxonómicas de los microorganismos asociados a los insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	51
4.3.2	Características morfológicas de los microorganismos asociados a las larvas de insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	53
4.4	Descripción del mecanismo de degradación del poliestireno por los insectos reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	56
4.5	Técnicas utilizadas para la detección y cuantificación de la degradación del poliestireno por insectos y microorganismos asociados reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	57
4.6	Eficiencia de la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	62
V.	DISCUSIÓN.....	65
5.1	Características taxonómicas y morfológicas de los insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	65
5.2	Características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos asociados a los insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	66
5.3	Mecanismo de degradación del PS por los insectos y microorganismos reportados como degradadores en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	68
5.4	Técnicas utilizadas para la detección y cuantificación de la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados.....	72
5.5	Comparación de la eficiencia en la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	74
VI.	CONCLUSIONES.....	75
VII.	RECOMENDACIONES.....	77
VIII.	REFERENCIAS.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Órdenes de insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	32
Tabla 2. Características taxonómicas de los insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	33
Tabla 3. Insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, 2015-2021.....	33
Tabla 4. Insectos reportados como degradadores de poliestireno en Asia, 2015-2021.....	34
Tabla 5. Insectos reportados como degradadores de poliestireno en Europa, 2015-2021.....	34
Tabla 6. Frecuencia de géneros de insectos reportados como degradadores de poliestireno en, América Asia y Europa, 2015-2021.....	35
Tabla 7. Especies de coleópteros y lepidópteros reportados en diferentes países como degradadores de poliestireno en Asia, América y Europa, 2015-2021.....	35
Tabla 8. Características taxonómicas de los insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	37
Tabla 9. Bacterias asociadas a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en Asia, 2015-2021.....	47
Tabla 10. Bacterias asociadas a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, 2015-2021.....	47
Tabla 11. Microorganismos asociados a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en Europa, 2015-2021.....	48
Tabla 12. Géneros de bacterias y hongos asociados a los insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	49
Tabla 13. Frecuencia de publicaciones en los que se reportaron los diferentes géneros de bacterias asociados a los insectos degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	50
Tabla 14. Taxonomía de bacterias asociados a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	52
Tabla 15. Taxonomía de hongos asociados a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	54

Tabla 16. Frecuencia de uso de las técnicas para la detección de la degradación de poliestireno en Asia, 2015-2021.....	59
Tabla 17. Frecuencia de uso de las técnicas para la cuantificación de la degradación de poliestireno en Asia, 2015-2021.....	60
Tabla 18. Frecuencia de uso de las técnicas para la detección de la degradación de poliestireno en América y Europa, 2015 -2021.....	60
Tabla 19. Frecuencia de uso de las técnicas de cuantificación de la degradación de poliestireno en América y Europa, 2015 -2021.....	61
Tabla 20. Eficiencia de la degradación del poliestireno por insectos y microorganismos reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	63
Tabla 21. Eficiencia de la degradación del poliestireno por microorganismos asociados a insectos reportados en Asia, 2015-2021.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de selección de artículos para la revisión sistémica con el enfoque PRISMA de los artículos sobre la degradación del PS por los insectos y microorganismos asociados publicados durante 2015-2021.....	29
Figura 2. Frecuencia de artículos sobre insectos degradadores de poliestireno publicados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	30
Figura 3. Frecuencia de reportes de coleópteros y lepidópteros como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	32
Figura 4. Frecuencia de especies de insectos reportados como degradadoras de poliestireno en América Asia y Europa, 2015-2021.....	36
Figura 5. Adultos de Coleópteros <i>Tenebrio molitor</i> (a), <i>T. obscurus</i> (b), <i>Zophobas morio</i> (c), <i>Z. atratus</i> (d), <i>Tribolium castaneum</i> (e), <i>Alphitobius diaperinus</i> (f), <i>Plesiophthalmus davidis</i> (g) y <i>Uloma</i> sp. (h), reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	39
Figura 6. Adulto de <i>Galleria mellonella</i> *, reportado como degradador de poliestireno en Asia y Europa, 2015-2021.....	41
Figura 7. Larvas de Coleópteros <i>Tenebrio molitor</i> (a), <i>T. obscurus</i> (b), <i>Zophobas morio</i> (c), <i>Z. atratus</i> (d), <i>Tribolium castaneum</i> (e), <i>Alphitobius diaperinus</i> (f) y <i>Uloma</i> sp. (g), reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	42
Figura 8. Larva de <i>Galleria mellonella</i> *, reportado como degradador de poliestireno en Asia y Europa, 2015-2021.....	43
Figura 9. Frecuencia de artículos sobre microorganismos asociados a insectos degradadores de poliestireno publicados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	45
Figura 10. Frecuencia de bacterias y hongos asociados a larvas de insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	45
Figura 11. Frecuencia de bacterias Gram positivas y Gram negativas asociadas a larvas de insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	46

Figura 12. Frecuencia de bacterias según su morfología asociadas a larvas de insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	46
Figura 13. Porcentaje de reportes de larvas de insectos degradadores de poliestireno con y sin suplemento en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	58
Figura 14. Porcentaje de reportes de microorganismos en el contenido intestinal y heces de insectos degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	58
Figura 15. Porcentaje de reportes del uso de antibióticos para verificar la actividad degradadora del poliestireno en larvas de insectos en América, Asia y Europa, 2015-2021.....	59

RESUMEN

El poliestireno (PS) es de gran utilidad en la vida diaria; sin embargo, los monómeros constituyentes son posibles cancerígenos para los humanos, en el suelo disminuyen el crecimiento de las plantas y en el agua alteran el metabolismo y afectan la reproducción de los animales. La degradación natural del PS es muy lenta; no obstante, existen microorganismos asociados a los insectos que aceleran este proceso. El objetivo de la investigación fue describir la eficiencia de insectos y microorganismos asociados degradadores de poliestireno identificados en América, Asia y Europa, 2015-2021. Se identificaron 110 artículos científicos en las bases de datos Scopus, Web of Science y American Chemical Society de los cuales se analizaron 38 artículos. Los insectos del Orden Coleóptera se reportaron como degradadores de PS en el 89 % de las publicaciones y los Lepidóptera en el 11 %. Las bacterias predominaron (89 %) en comparación con los hongos (11 %). En el 60 % de los artículos se reportó que las larvas de los insectos pueden degradar el PS al utilizarlo como única fuente de nutriente y en el 96 % de las investigaciones se demostraron microorganismos en el intestino y excretas de las larvas. Las técnicas más usadas para la detección de la degradación del PS fueron la Microscopía electrónica de barrido y la Espectrometría y para la cuantificación fueron la Termogravimetría y la Espectroscopía por transformada de Fourier. La eficiencia de los insectos reportados como degradadores de poliestireno en América fue 0,031-0,210 mg larva⁻¹ día⁻¹; en Asia de 0,003-34,27 mg larva⁻¹ día⁻¹ y en Europa 0,022-4,000 mg larva⁻¹ día⁻¹, con una tasa de supervivencia de 23,66-99,90 % y una tasa de degradación del PS por los microorganismos asociados a los insectos de $7,4 \pm 0,4$ - $12,97 \pm 1,05$ %.

Palabra clave: Eficiencia, microorganismos asociados, poliestireno, insectos degradadores, biodegradación

ABSTRACT

Polystyrene (PS) is very useful in daily life; however, the constituent monomers are possibly carcinogenic to humans, in soil they decrease plant growth and in water they alter metabolism and enhance animal reproduction. The natural degradation of PS is very slow; however, there are microorganisms associated with insects that accelerate this process. The objective of the research was to describe the efficiency of insects and associated microorganisms that degrade polystyrene identified in America, Asia and Europe, 2015-2021. 110 scientific articles were identified in the Scopus, Web of Science and American Chemical Society databases, of which 38 articles were analyzed. Insects of the Order Coleoptera were reported as PS degraders in 89 % of the publications and Lepidoptera in 11 %. Bacteria predominated (89%) compared to fungi (11%). In 60 % of the articles it was reported that insect larvae can degrade PS when using it as the only nutrient source and in 96 % of the investigations organisms were demonstrated in the intestine and excreta of the larvae. The most used techniques for the detection of PS degradation were scanning electron microscopy and spectrometry and for quantification they were thermogravimetry and Fourier transform spectroscopy. The efficiency of the insects reported as degraders of polystyrene in America was $0,031\text{--}0,210\text{ mg larva}^{-1}\text{ day}^{-1}$; in Asia $0,003\text{--}34,27\text{ mg larva}^{-1}\text{ day}^{-1}$ and in Europe $0,022\text{--}4,000\text{ mg larva}^{-1}\text{ day}^{-1}$, with a survival rate of 23,66-99,90 % and a PS degradation rate per microorganisms associated with insects from $7,4 \pm 0,4 - 12,97 \pm 1,05\%$.

Key word: Efficiency, associated microorganisms, polystyrene, degrading insects, biodegradation

I. INTRODUCCIÓN

Los plásticos son polímeros orgánicos producidos a partir de petróleo. Tienen características deseables como flexibilidad, durabilidad, ligereza y bajo precio, por lo que se encuentran en la mayoría de objetos utilizados en la vida diaria (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2017). En el mercado de plásticos predominan el tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS), polipropileno (PP) y cloruro de polivinilo, PVC (Greenpeace, 2016), de ellos el poliestireno (PS) y sus monómeros constituyentes son considerados como posibles cancerígenos para los humanos (Kik et al., 2020). El PS implica peligro químico cuando los monómeros, plastificantes y otros aditivos son liberados como consecuencia de un proceso de polimerización incompleto, así como también constituye un peligro químico cuando el PS se rompe con liberación de microplásticos al ambiente (Farely y Shaw, 2017).

En el 2014, el consumo de PS fue de 359 millones de toneladas, de las que 53 % correspondió a Asia, 27 % a Europa y 11 % a Norte América (Flores, 2016). Considerando que el PS constituye el 7 % del total del plástico producido y que el 3 % de éste flota en el océano, se ha estimado que desde 1950 a 2015 ingresaron al océano $1,5 \times 10^7$ megatoneladas del polímero (Saido et al., 2020). En las playas de 25 países se encontraron oligómeros de estireno, constituyente del PS y se cuantificaron desde $0,74 \text{ ug kg}^{-1}$ en la arena y $0,93 \text{ ug L}^{-1}$ en el agua de mar de Alaska, hasta $31\,400 \text{ ug kg}^{-1}$ en la arena de Grecia y $30,4 \text{ ug L}^{-1}$ en el agua de mar de Estados Unidos (Kwon et al., 2015).

La espuma de PS es uno de los residuos más importantes que se encuentran flotando en el mar o son arrastrados a lo largo de la costa (Sharp, 2020). Los monómeros de estireno se han encontrado a 4 000 m de profundidad en el océano (Saido et al., 2020), las partículas de PS en las comunidades de microplancton (Badylack et al., 2021) y aditivos como el hexabromociclododecano brominado (HBCD) en *Mytilus galloprovincialis* “mejillones” (Jang et al., 2016). El PS afecta la reproducción de los animales marinos como *Crassostrea gigas* (Sussarellu et al., 2016), reduce en forma significativa la alimentación en los copépodos y altera el metabolismo y comportamiento de las carpas (Fauna & Flora International's, 2020).

En el suelo, el PS disminuye el crecimiento y la biomasa de las raíces de *Vicia faba*, incrementa la actividad enzimática superóxido dismutasa (SOD) y peroxidasa (POD) y bloquea el transporte de nutrientes en las plantas (Jiang et al., 2019), también inhibe el crecimiento y aumenta la mortalidad de *Eisenia foetida* “lombriz de tierra” (Cao et al.,

2017). Las nanopartículas de PS penetran en los organismos a través de la piel y los tractos respiratorio y digestivo, se movilizan por pinocitosis, fagocitosis y transporte pasivo, se bioacumulan y se biomagnifican (Kik et al., 2020).

El PS puede ser degradado y mineralizado hasta dióxido de carbono por larvas de insectos como *Tenebrio molitor* (Yang et al., 2018b) entre otros y bacterias asociadas de los géneros *Enterobacter* (Yang et al., 2018a), *Citrobacter*, *Alcaligenes* (Sekhar et al., 2016) y *Pseudomonas* (Mohan et al., 2016); no obstante, el carácter hidrofóbico del polímero, el elevado peso molecular y los antioxidantes, lubricantes y los aditivos usados durante su obtención (Worzakowska, 2015) desfavorecen la oxidación y la biodegradación (Ho et al., 2018). Se requiere la revisión de publicaciones sobre la eficiencia de los insectos y microorganismos asociados degradadores del PS en América, Asia y Europa durante 2015-2021.

El poliestireno es un polímero resistente a la biodegradación, que contamina los ecosistemas terrestre y marino. La problemática generada por estos polímeros puede tratarse de diversas maneras; no obstante, los insectos y microorganismos asociados disminuyen el contaminante de una manera amigable con el ambiente. Los insectos, una vez utilizados para la degradación del PS, constituyen materia orgánica que puede ser procesada para el mejoramiento del suelo. Asimismo, los microorganismos asociados metabolizan una variedad de sustratos, por lo que se pueden utilizar para degradar otros contaminantes. Estos organismos demuestran su eficiencia en la degradación al resolver el problema de la contaminación y además colaboran con la producción ya que el producto de la degradación puede ser utilizado como bioabono.

En este contexto, se realizó la siguiente investigación cuyo problema fue: ¿Cuál es la eficiencia de los insectos y microorganismos asociados degradadores de poliestireno identificados en América, Asia y Europa, 2015-2021? El objetivo general fue: Determinar la eficiencia de insectos y microorganismos asociados degradadores de poliestireno identificados en América, Asia y Europa, 2015-2021. Los objetivos específicos de la investigación fueron: Realizar la revisión sistemática en las bases de datos Scopus, Web of Science (WOS) y American Chemical Society (ACS) de los artículos científicos sobre la eficiencia de los insectos y microorganismos asociados degradadores de poliestireno, describir las características taxonómicas y morfológicas de los insectos reportados como degradadores de poliestireno, describir las características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos asociados a los insectos reportados como degradadores de poliestireno, describir el mecanismo de degradación del poliestireno por los insectos y

microorganismos asociados, diferenciar las técnicas utilizadas para la detección y cuantificación de la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados y comparar la eficiencia en la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Insectos degradadores de poliestireno

Kundungal et al. (2021) investigaron la degradación de PS por larvas de *Uloma* sp. en la India. Las larvas se acondicionaron a 28 °C, 80 % de humedad, durante 28 días. Un primer grupo de larvas se alimentó con PS como única dieta, un segundo grupo con cera de abeja (WC) y un tercer grupo no fue alimentado (NA). Al entrar en contacto con el PS, las larvas perforaron de forma inmediata el PS, con una tasa de consumo de 0,37 mg/día, superior al testigo *Tenebrio molitor* con 0,12 mg/día, pero inferior a la superlarva de *Zophobas atratus* con 0,58 mg/día. El crecimiento y desarrollo de *Uloma* sp. alimentado con PS fue afectado en la segunda generación de larvas; no obstante, se demostró que el PS es un sustrato para la obtención de energía requerida para el mantenimiento y sobrevivencia de *Uloma* sp.

Yang et al. (2020) estudiaron la biodegradación y mineralización del PS por *Z. atratus* en China. Las dietas alimenticias fueron Styrofoam con 95 % de PS (T1) y salvado (T2). La tasa promedio de consumo de T1 fue de 0,58 mg/día. El análisis de las excretas mediante GPC y termogravimetría demostró la despolarización de las cadenas del PS y la formación de productos de bajo peso molecular. El test respirométrico demostró que 36,7 % del PS fue mineralizado a dióxido de carbono durante 16 días. En las larvas, la capacidad para degradar el PS fue inhibida por la ingestión de antibióticos, evidenciando el papel de los microorganismos del tracto intestinal en la degradación. Se demostró que las larvas de *Z. atratus* son capaces de mineralizar el PS.

Yang et al. (2018a) evaluaron los factores que afectan la tasa de biodegradación del PS por larvas de *T. molitor* en China. Los tratamientos fueron alimento con PS (T1) y PS más salvado (T2). Asimismo, se investigó la degradación de EPS (densidad 0,021 g/cm³), XPS (0,036-0,039 g/cm³), XPS (0,042 g/cm³) en la proporción salvado: PS de 6:1, durante 32 días. En el primer ensayo la tasa de sobrevivencia fue de 86,7 % con T1, sin diferencias significativas con 90 % (T2). La tasa específica de consumo resultó dependiente de la densidad del PS ensayado, siendo de 45,8 % con EPS y 19,9 % con XPS. Se concluyó que la densidad del PS influye en la degradación del PS.

Yang et al. (2018b) realizaron la comparación de la degradación del PS por larvas de *T. molitor* en cuatro localidades diferentes de China. El alimento fue suministrado en tres tratamientos: PS (T1), PS+salvado (T2) y sin PS ni salvado (T3). En todos los lugares las larvas consumieron el PS, con tasas de sobrevivencia similares en T1 y T2. En los restos del polímero analizados en las excretas de las larvas se encontró evidencia de la despolimerización del PS, así como también de reducción del número y peso molecular. El análisis FTIR demostró la incorporación de oxígeno en el PS. Se concluyó que la degradación del PS es una capacidad intrínseca de las larvas de *T. molitor*, independiente de las condiciones ambientales de la localización geográfica.

2.1.2. Microorganismos asociados a insectos degradadores de poliestireno

Wang et al. (2020b) investigaron la diversidad microbiana del intestino de larvas de *Tribolium castaneum*, identificaron los cambios físicos y químicos de la espuma de PS extruido (XPS) en China. Las larvas dispuestas en dos grupos se alimentaron con salvado (testigo) y XPS y con el contenido intestinal se realizó el aislamiento microbiano y caracterización molecular. Se identificó *Acinetobacter* sp. AnTc-1 con capacidad degradativa del polímero. Después de 60 días se determinó reducción del peso (12,14 %), peso molecular (13-25 %) y estabilidad térmica de (5,72 %). Se concluyó que AnTc-1 desempeña un rol importante en la degradación del polímero.

Urbanek et al. (2020) estudiaron la microbiota intestinal degradada de PS en larvas de *T. molitor* en Polonia. Éstas se alimentaron con PS para embalaje, PSp (T1), PS procesado por extrusión, PSr (T2), material comercializado para paquetes PSp (T3), PS expandido, EPS (T4), sin alimento (T5) y avena como control (T6). Al inicio y después de 21 días se examinó el contenido del intestino y se aislaron los microorganismos en medio sales minerales con 0,1 % de plástico emulsificado. Las bacterias con actividad biodegradable fueron *Klebsiella oxytoca*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Serratia marcescens*. Se demostró el potencial de las bacterias del intestino de las larvas de *T. molitor* para la degradación de diferentes tipos de PS.

Peng et al. (2019) realizaron la comparación de la degradación del PS por larvas de *T. molitor* y *T. obscurus* en China. Los tratamientos fueron: *T. molitor* sin alimento (T1), *T. molitor* PS (T2), *T. molitor* PS + salvado (T3), *T. obscurus* sin alimento (T4), *T. obscurus* PS (T5) y *T. obscurus* PS + harina de maíz (T6). La tasa de consumo fue de 32,44 mg / 100 larvas / día con *T. obscurus* y de 24,30 mg /100

larvas con *T. molitor*. En el excremento de *T. obscurus* el peso del PS disminuyó en 26,03 % superando a 11,67 % en *T. molitor*. La gentamicina inhibió la despolimerización del PS y las familias predominantes fueron la *Enterobacteriaceae*, *Spiroplasmataceae* y *Enterococcaceae*. La degradación del PS fue mayor con *T. obscurus*.

Yang et al. (2015a) caracterizaron la biodegradación del PS por larvas de *T. molitor* en China. Éstas se alimentaron con Styrofoam (98 % PS), incluyendo como testigos larvas alimentadas con salvado por 30 días. El análisis por espectroscopía de las excretas de las larvas demostró la despolimerización del PS. El 47,7 % del carbono del Styrofoam fue transformado en dióxido de carbono (CO₂) y el residuo (49,2 %) fue eliminado. Las pruebas con carbono radio marcado confirmaron la mineralización a CO₂. La degradación rápida del PS por las larvas de *T. molitor* demostró su potencial para la biorremediación de los ambientes contaminados con PS.

Yang et al. (2015b) estudiaron el rol de las bacterias intestinales de las larvas de *T. molitor* en la degradación del PS en China. Un grupo de 15 larvas se alimentaron con Styrofoam y se determinó el antibiótico capaz de inhibir a la biota intestinal. Las larvas alimentadas con gentamicina perdieron la capacidad para despolimerizar el PS. Se identificó *Exiguobacterium* sp. con capacidad degradativa del PS, observándose agujeros en la película de PS, asociado a la reducción de hidrofobicidad y formación de grupos polares. Se confirmó el rol de las bacterias en la degradación de PS por *T. molitor*.

2.2. Bases teóricas

El poliestireno (PS) es un polímero sintético aromático (C₈H₈)_n, extremadamente estable, con elevado peso molecular y fuertemente hidrofóbico, constituido por estireno o etilbenceno (Anexo 1). El monómero estireno se encuentra de forma natural en el petróleo o se puede obtener combinando el benceno y el etilbenceno (CIT, 2011). El PS se utiliza para cuatro tipos de productos. El PS para propósito general (GPPS) y orientado (OPS), el PS de alto impacto (HIPS), espuma de PS y PS expandido, EPS (Mohan et al., 2020). El GPPS /OPS se utiliza para contenedores, cubetas y soportes para loza; el HIPS para envases de yogurt, cremas, condimentas y platos; la espuma de PS para transporte de carnes, vasos de bebidas frías y calientes, envases para alimentos, huevos, frutas, vegetales y el EPS para contenedores refrescantes (Ho et al., 2018).

El proceso de obtención del PS y los compuestos elaborados con este polímero, implican toxicidad porque se emplean aditivos, lubricantes, antioxidantes, estabilizadores y retardantes de llama, muchos de ellos resistentes para la degradación del polímero (Ho et al., 2018). Los enlaces C-C en el PS no pueden ser rotos fácilmente por los procesos de oxidación- reducción, de tal manera que el polímero se mantiene estable (Flores, 2016) y contamina el suelo (Jiang et al., 2019; Cao et al., 2017) y el agua (Kik et al., 2020; Saido et al., 2020).

La biodegradación del PS se refiere a la predominancia de la actividad biológica de microorganismos en la degradación del polímero hasta compuestos de bajo peso molecular y mineralización a dióxido de carbono y agua, ya que en un inicio el polímero no puede atravesar la membrana celular y no es degradado (Yang et al., 2018a). Las moléculas de estireno, constituyentes del PS son utilizadas como fuente de carbono por los microorganismos con actividad enzimática. Éstos oxidan el monómero hasta fenilacetato, el cual posteriormente es metabolizado mediante el ciclo de los ácidos tricarboxílicos. Son importantes las enzimas lacasas, oxidoreductasas, hidroxilasas e hidroxiquinonas reductasas (Mohan et al., 2020).

Existen larvas de coleópteros y polillas capaces de despolimerizar y mineralizar el PS con formación de agua y dióxido de carbono en 24 horas (Rodríguez et al., 2021). Entre los gusanos de la harina o larvas de escarabajos reportados en América está *T. molitor* L. “escarabajo amarillo” (Peña et al., 2020), en Asia *T. obscurus* “escarabajo oscuro” (Peng et al., 2019) y en Europa *T. castaneum* “escarabajo castaño” (Rodríguez et al., 2021). Entre las polillas de la cera degradadoras de PS reportadas en América se encuentran *Galleria mellonella* L. “polilla mayor” (Billen et al., 2020), en Asia y en Europa *Plodia interpunctella* H. “polilla de la India” (Rodríguez et al., 2021).

Las larvas de los insectos digieren el PS expandido (EPS). Se ha demostrado que el 47 % de EPS es mineralizado hasta dióxido de carbono; el 49,2 % es excretado como humus y 1 % es incorporado a la biomasa de la larva. Asimismo, en el EPS se ha determinado un rango de 7,14-65,0 % de pérdida de peso, disminución del peso molecular y modificaciones estructurales durante 7-91 días, con una eficiencia específica de degradación (EED) de hasta 0,83 mg larva⁻¹ día⁻¹ con *T. castaneum* (Rodríguez et al., 2021).

Las enzimas esterasa y aril-amidasa de las larvas están relacionadas con la degradación del PS (Przemieniecki et al., 2020); no obstante, es importante remarcar el papel que desempeñan los microorganismos del intestino. El polímero es utilizado como fuente de carbono, mediante la acción enzimática extracelular e intracelular de la microbiota intestinal de los insectos (Ho et al., 2018). La biodegradación se inicia cuando el microorganismo crece en la superficie del PS y secreta enzimas para fragmentarlo en oligómeros e inclusive en unidades monoméricas, que son oxidados hasta fenilacetato, el cual ingresa al ciclo de Krebs.

Las enzimas alcano hidroxilasas, monooxigenasas y citocromo P450, con alto potencial para la despolimerización y que tienen el rol principal en la ruptura de las cadenas carbonadas del PS, se encuentran en los géneros potencialmente degradadores *Cupriavidus*, *Burkholderia*, *Klebsiella*, *Kosakonia*, *Cronobacter*, *Citrobacter*, *Alcaligenes*, *Aeromonas*, *Brevundinomas*, *Serratia*, *Pseudomonas* (Proteobacteria), *Rhodococcus* (Actinobacteria), *Bacillus*, *Cytobacillus*, *Enterococcus*, *Listeria* y *Exiguobacterium* (Firmicutes) y en hongos de los géneros *Gloeophyllum* y *Talaromyces* (Hou et al., 2021; Wang et al., 2020a).

En el intestino de los insectos degradadores de PS se ha identificado una diversidad microbiana de los géneros de bacterias *Cronobacter*, *Kocuria* y *Pseudomonas* y los hongos *Aspergillus*, *Hyphodermella* y *Trichoderma* en *Alphitobius diaperinus* (Cucini et al., 2020), *Pseudomonas* en *Z. morio* (Min et al., 2020), *Klebsiella*, *Pseudomonas* y *Serratia* en *T. molitor* (Urbanek et al., 2020), *Enterobacter*, *Spiroplasma* y *Enterococcus* en *T. obscurus* (Liaqat et al., 2020).

La degradación del PS se detecta por microscopía electrónica de barrido y se cuantifica mediante balanza analítica, espectrometría infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR), resonancia magnética nuclear (NMR), resonancia magnética en estado líquido (H-NMR), cromatografía de permeación en gel (GPC), cromatografía de gases (GC), cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), cromatografía de alta presión líquida (HPLC), termogravimetría (TGA) y análisis respirométrico (Rodríguez et al., 2021; Ho et al., 2018).

2.3. Definición de términos básicos

Estireno: Líquido incoloro que se obtiene como derivado del petróleo y se utiliza para producir materiales plásticos que se caracterizan por su bajo peso y su extraordinaria resistencia. El almacenaje de este monómero deberá hacerse siempre con la adición previa de inhibidores (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino [MARM], 2009).

Poliestireno: Compuesto que se obtiene de la polimerización del estireno, es liviano, rígido, aislante térmico y útil para las actividades del ser humano (Centro de Información Técnica [CIT], 2011). Tiene moléculas lineales, químicamente inerte y muestra una excelente resistencia química y eléctrica (Begum et al., 2020).

Tipos de poliestireno:

XPS: Espuma de poliestireno extruido, es un material aislante, se forma en un proceso único y continuo que da como resultado un material con una estructura celular uniforme; generalmente este material es coloreado, ampliamente utilizado en la industria de la construcción y tiene alta resistencia a la compresión (Pérez et al., 2016).

EPS: Poliestireno expandido, tiene una consistencia semiviscosa y forma esferas que son expandidas en espuma por medio de calor (usualmente vapor). Este proceso de polimerización llena el poliestireno con millones de bolsas de aire lo que ayuda a expandirlo y a que sea un material de baja conductividad térmica, su producto final es 90 % aire (Poletto et al., 2011).

HIPS: Poliestireno de alto impacto, mediante la adición de polibutadieno se consigue mejorar su resistencia al impacto, los principales usos finales son los embalajes, contenedores y vasos desechables, productos electrónicos de consumo, casetes de audio y vídeo, armarios para televisores, revestimientos de refrigeración, y juguetes (Grassi et al., 2001).

GPPS/OPS: Poliestireno de uso general que procede de la polimerización del PS puro, es liviano, rígido, frágil a temperatura ambiente y baja resistencia a las altas temperaturas, hasta los 95 °C. El poliestireno cristal es vítreo y por encima de esa temperatura altera su forma. Se utiliza para todo tipo de accesorios y objetos destinados al contacto con alimentos (Instituto Regional de Investigación de Recursos Naturales [IRPEN], 2019).

Eficiencia: Capacidad para lograr un máximo resultado con el mínimo de recurso, energía, tiempo y costo, por lo que es la óptima utilización de los recursos disponibles para la obtención de resultados deseados (Rojas et al., 2017).

Biodegradación de poliestireno: Deterioro o mineralización del polímero de PS al ser atacado por organismos biológicos, que lo degradan, dada la capacidad que manifiestan éstos para metabolizar dicho compuesto utilizándolo como fuente de carbono. La biodegradabilidad se determina por la producción de CO₂, el consumo de O₂, pérdida de peso, el aumento de las células o de la masa de las células (si el polímero es la única fuente de carbono), examen físico de la muestra para detectar evidencias del crecimiento de la colonia y la destrucción de la muestra (Ccallo et al., 2020).

Bacterias degradadoras del poliestireno: Bacterias que en presencia de poliestireno como única fuente de energía muestran aumento de su masa celular, con una percepción visual de la disminución o mineralización de la capa de poliestireno (Hernández et al., 2015).

Microorganismos asociados: Microorganismos colonizadores de la flora intestinal. Pueden ser comensalistas, parásitos o beneficiosos para su hospedador al ayudar en la digestión, metabolismo y protección frente a patógenos (Poveda, 2019).

Biorremediación: Remediación biológica que utiliza organismos vivos, especialmente microorganismos con capacidad de transformar, degradar, reducir y eliminar naturalmente riesgos medioambientales resultantes de la acumulación de compuestos químicos o tóxicos (Garzón et al., 2017; Cota et al., 2019).

Insectos degradadores: Insectos que a través de sus larvas y microorganismos intestinales tienen la capacidad para descomponer y metabolizar los polímeros plásticos (Khan et al., 2021).

Técnicas de detección:

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope), detecta la biodegradación utilizando un haz de electrones para formar una imagen en el cual se observan biopelículas microbianas en láminas de PS, generando grietas, huecos, etc. Además mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar figuras en

tres dimensiones. Su resolución está entre 4 y 20 nm. (Vera et al., 2021; Peña et al., 2020; Yang et al., 2019).

Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La Calorimetría Diferencial de Barrido (Differential Scanning Calorimetry, DSC) esta técnica evalúa el efecto de la temperatura sobre la variación de la capacidad calorífica (C_p) del PS. Permite ensayar materiales en ciclos térmicos a velocidades de calentamiento y enfriamiento controladas. 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 se muestra el debilitamiento de los enlaces del polímero, debido al proceso biodegradativo (Reynoso y Danón, 2016; Quinchía y Maya, 2015).

Microscopía de fluorescencia:

La microscopía de fluorescencia se caracteriza por la formación de imágenes amplificadas, donde el polímero al ser analizada es iluminada con luz incidente y la luz reflejada es la que forma la imagen. Esta técnica permite detectar la degradación de la película del PS mediante el cual se observan biopelículas, biocapas o biofilms las cuales son teñidas con fluorocromos como la rodamina B. Estos microscopios generalmente utilizan lámparas halógenas de alta potencia (~300 Watts) de luz blanca. (Butrón, 2020; Ormachea y Villazón, 2017; Duddu et al., 2015).

Espectrofotometría de dispersión de energía de rayos X(EDS):

La espectrofotometría dispersion de energía de rayos X (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) permite la caracterización química del PS provocada por una fuente de energía, asimismo registra la degradacion del PS por accion de las bacterias y hongos . Esta técnica está basada en la incidencia de electrones, los cuales al interactuar con polimero excitan a sus átomos provocando la emisión de rayos X cuya longitud de onda es característica de los elementos presentes en la muestra. (Liu et al., 2022; Skariyachan et al., 2017; Chavez et al., 2014).

Técnicas de cuantificación:

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR):

Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) caracteriza la despolimerización de las moléculas de PS de cadena larga y la formación de productos de bajo y alto peso

molecular, permite la oxidación de las cadenas largas de hidrocarburos y destrucción del anillo bencénico. Asimismo, confirman la modificación del polímero por la degradación e incorporación del oxígeno al diferenciar nuevos picos asociados a los grupos carbonilos ($\text{H}_2\text{C}=\text{O}$), hidroxilos ($-\text{OH}$) y demuestran la disminución de los anillos bencénicos: $\text{C}=\text{C}$ (Kundungal et al., 2021; Yang et al. 2020; Yang et al., 2018).

Termogravimetría (TGA):

Termogravimetría (Thermal Gravimetric Analysis, TGA) detecta las modificaciones térmicas del PS indicando una disminución significativa del peso molecular del polímero, así como la formación de grupos funcionales hidrofílicos, lo que generaría una mayor solubilidad y comúnmente, una disminución en su toxicidad y recalcitrancia evidenciando su degradación (Kundungal et al. 2021; Peng et al., 2019). Además revela las propiedades térmicas del PS que fueron influenciadas por la incubación de los microorganismos y evalúa la estabilidad térmica del PE biodegradado y del PS de alto impacto. (Wang et al., 2020; Peng et al. 2019; Mohan et al., 2016;)

Cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-TO):

Cromatografía de gases-espectrometría de masas (Gas chromatography/Mass spectrometry, GC-TO) identifica productos de la degradación microbiana de la cadena plegada del poliestireno como son el fenol y alcanos como dodecano, octadecano, tetracosano, pentacosano y hexacosano, ácidos grasos como ácido hexadecanoico y ácido octanoico, grupo éster de alcohol y otros compuestos desconocidos (Ho et al., 2018).

Cromatografía por permeación en gel (GPC):

Cromatografía por permeación en gel (Gel Permeation Chromatography, GPC) es una técnica que determina los cambios en las propiedades físicas y químicas del PS, revela la disminución del peso molecular promedio en peso (M_w) y del peso molecular promedio en número (M_n) (Woo et al., 2020). Asimismo separa oligómeros, monómeros y aditivos de una disolución polimérica compleja si las diferencias de peso molecular entre los componentes son significativas. Inicialmente, el equipo debe ser calibrado con diferentes muestras de distinto peso molecular, para después determinar los pesos de las muestras de distintos plásticos. El uso de las dos calibraciones permite determinar el grado de degradación y la concentración de los polímeros (Tanaka, 2015).

Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS):

Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) es una técnica que evalúa los enlaces químicos en las superficies de materiales como el plástico, sin embargo, se necesita una buena calibración para determinar la escala de energía de los enlaces así como también la estructura de enlaces y composición de superficies e interfaces. Esta técnica está basado en el efecto fotoeléctrico que causa la irradiación con rayos X de baja energía sobre la superficie del polímero la cual causa la fotoionización de los átomos de la misma permitiendo la emisión de fotoelectrones a partir de los niveles de energía determinados por la estructura electrónica del material (Greczynski , 2020; Woo et al., 2020).

Resonancia magnética nuclear (RMN):

La Resonancia Magnética Nuclear (RMN) es un método en la cual es indispensable la presencia de un campo magnético de varios teslas de magnitud para generar estados discretos de energía. Detectan cambios químico asociado con $-\text{CH}=\text{CH}-$, grupos carbonilo ($\text{H}_2\text{C}=\text{O}$) e hidroxilo ($-\text{OH}$) evidenciando transformaciones transformaciones y modificaciones del PS. Permite la detección de protones, que muestra los carbonos que se encuentran a 2 o 3 enlaces de distancia de los protones, estos experimentos permiten observar los protones enlazados directamente o remotamente, hasta 4 enlaces. (García et al., 2022; Yang et al., 2018; Zamorano et al., 2017)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

El material estuvo constituido por artículos relacionados con la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados publicados en América, Asia y Europa (2015-2021).

3.2. Población y muestra

La población estuvo constituida por todos los artículos científicos relacionados a la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados publicados en América, Asia y Europa, recopilados en las bases de datos Scopus, Web of Science (WOS) y American Chemical Society (ACS). La muestra no probabilística y por conveniencia correspondió a los artículos publicados durante los últimos 7 años (2015-2021). El criterio de inclusión fue los microorganismos del intestino de las larvas de los insectos con capacidad de degradar el PS y el criterio de exclusión fue otros microorganismos degradadores del PS, presentes en el suelo u otros ambientes.

3.3. Métodos

3.3.1. Variables cualitativas

Insectos (Supervivencia, peso final de larvas y peso de excretas)

Microorganismos (Hongos y bacterias)

Poliestireno (polímero residual en excrementos de larvas de insectos o en cultivos de microorganismos intestinales previamente aislados)

Eficiencia de la degradación (Porcentaje)

3.3.2. Tipo de estudio y técnica

La investigación fue descriptiva según el enfoque, básico transversal, retrospectivo con datos secundarios y diseño no experimental (Gallardo, 2017), que consistió en la búsqueda, análisis, crítica e interpretación de los datos obtenidos y registrados en diversas fuentes documentales (revistas científicas) existentes del 2015 al 2021 sobre la eficiencia de insectos y microorganismos asociados degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa. En el presente estudio se utilizó el método de investigación cualitativa y la técnica cualitativa de tipo observacional (Neill y Cortez, 2018).

3.3.3. Procedimiento

a) **Revisión sistemática de los artículos científicos sobre la degradación del PS por insectos y microorganismos asociados publicados durante 2015-2021**

En las bases de datos Scopus, Web of Science (WOS) y American Chemical Society (ACS) se realizó la búsqueda con las palabras clave: polystyrene AND insects, limitada al período 2015-2021 y tipo de documento “artículo”. De esta manera, se estableció el protocolo de búsqueda mediante las palabras clave y operadores booleanos:

TITLE-ABS-KEY (polystyrene AND insects) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))

A continuación, se realizó el análisis PRISMA, para lo cual los artículos científicos se exportaron a tres hojas de EXCEL (una para cada base de datos), se integró la información, 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 de las diferentes fases del análisis.

b) **Determinación de las características taxonómicas y morfológicas de los insectos reportados como degradadores de poliestireno**

Las características taxonómicas y morfológicas de los insectos reportados como degradadores de poliestireno se describieron con ayuda de tablas y figuras elaborados con la información de los diferentes artículos científicos analizados.

c) **Determinación de las características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos asociados a los insectos degradadores de poliestireno**

Las características taxonómicas y morfológicas de las bacterias y hongos asociados a los insectos degradadores de poliestireno se describieron con ayuda de tablas elaboradas con la información de los diferentes artículos científicos analizados.

d) Descripción del mecanismo de degradación del poliestireno por los insectos reportados

El mecanismo de degradación del poliestireno por los insectos reportados se analizó y describió considerando la información de los artículos científicos investigados.

e) Diferenciación de las técnicas utilizadas para la detección y cuantificación de la degradación del poliestireno

Las técnicas de detección y cuantificación de la degradación del poliestireno se diferenciaron con ayuda de tablas en las que se visualizó la frecuencia de uso de cada una de ellas.

f) Comparación de la eficiencia en la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados

La eficiencia en la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados se determinó mediante la tasa de consumo del polímero ($\text{mg larva}^{-1}\text{día}^{-1}$) y la tasa de supervivencia de las larvas así como también por la tasa de consumo (%) del PS por los microorganismos asociados, información obtenida en los artículos científicos analizados.

3.3.4. Instrumentos

Los instrumentos fueron las bases de datos Scopus, Web of Science (WOS) y American Chemical Society (ACS), así como otros artículos de acceso libre en INTERNET. Asimismo, se utilizaron materiales de escritorio, laptop, computadora con conexión a internet para la búsqueda, recolección y almacenamiento de datos y el bloc de notas para registrar la información.

3.3.5. Aspectos éticos

La investigación fue de tipo descriptiva y documental, por lo que se recopiló información de distintas fuentes en forma veraz y fidedigna, bajo el criterio del respeto al derecho del autor, términos y condiciones del Manual de Publicaciones de la American Psychological Association 7ma edición (APA).

3.3.6. Procesamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos en los documentos publicados por los distintos autores se organizaron en tablas y figuras con el programa Microsoft Office Profesional 2016 y Software IBM SPSS Stastics V25 (2017), que en conjunto facilitaron el análisis y comprensión de las características taxonómicas y morfológicas de los

insectos y microorganismos asociados reportados como degradadores de poliestireno, del mecanismo de degradación del poliestireno, las técnicas utilizadas para la detección y cuantificación del poliestireno degradado y la eficiencia en la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados.

IV. RESULTADOS

El análisis de 28 artículos científicos sobre insectos degradadores de poliestireno, permitió describir las características taxonómicas y morfológicas de los insectos investigados y el mecanismo de degradación de poliestireno por estos organismos. Con el análisis de 22 artículos científicos sobre microorganismos asociados a los insectos degradadores de poliestireno se describieron las características de los microorganismos asociados a los insectos degradadores de PS, se diferenciaron las técnicas utilizadas para la detección y cuantificación de la degradación del PS y se comparó la eficiencia en la degradación del PS por los insectos y microorganismos asociados, reportados en América, Asia y Europa durante 2015-2021.

4.1. Revisión sistemática de los artículos científicos sobre la degradación del poliestireno por insectos y microorganismos asociados publicados durante 2015-2021

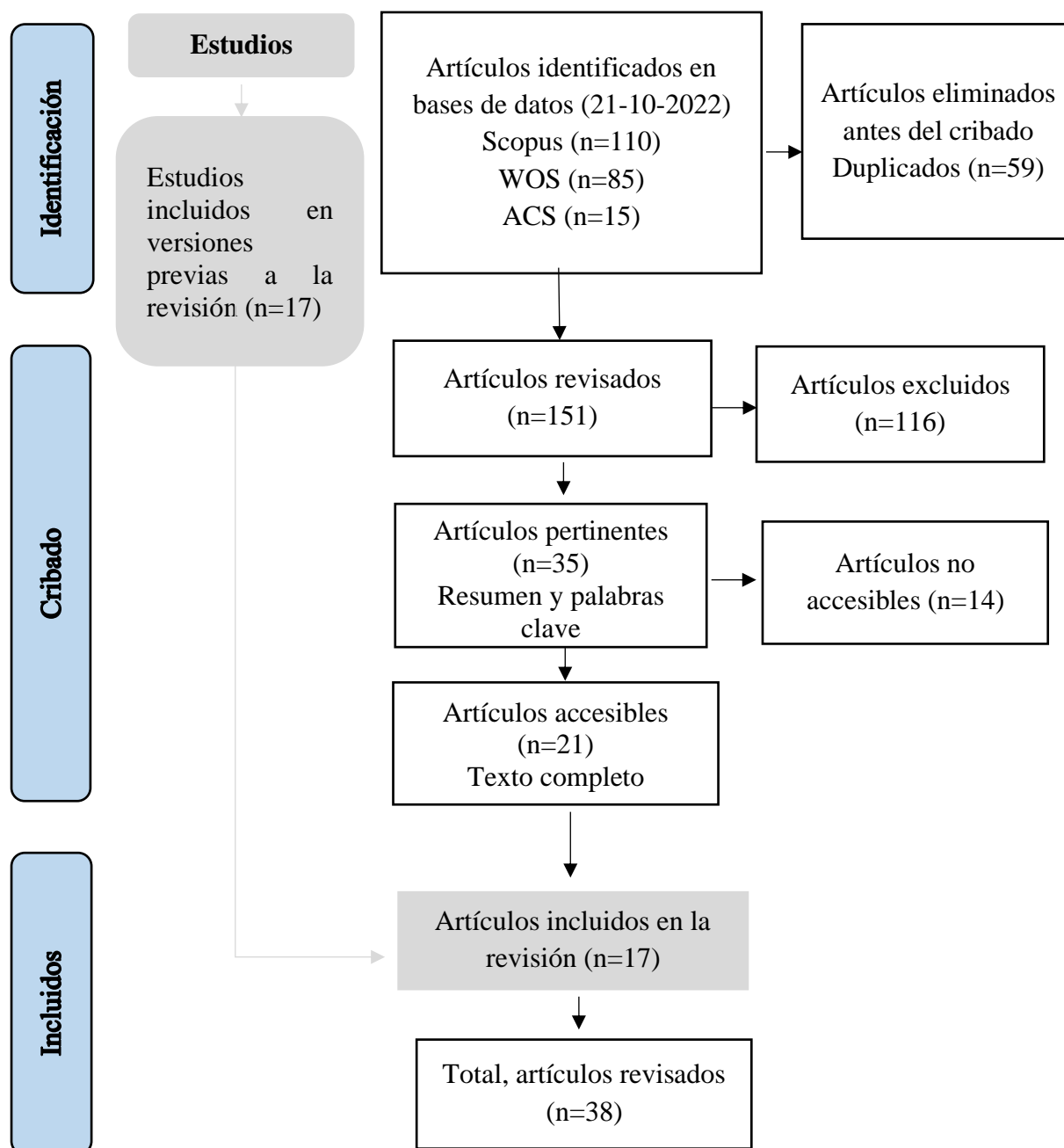
El protocolo permitió identificar 110 artículos científicos en la base de datos Scopus, 85 artículos en Web of Science (WOS) y 15 artículos en American Chemical Society (ACS). Se encontraron 59 duplicados, se revisaron (resumen y palabras clave) 151 documentos y se excluyeron 116 artículos no alineados al tema específico. De los 35 artículos pertinentes, catorce no fueron accesibles y 21 artículos se descargaron a texto completo. Asimismo, se incluyeron 17 artículos y de esta manera se analizaron 38 artículos (Figura 1).

4.2. Características taxonómicas y morfológicas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021

La frecuencia de artículos sobre insectos reportados como degradadores de poliestireno durante 2015-2021 fue de 57 % en Asia, 25 % en Europa y 18 % América (Figura 2).

Figura 1

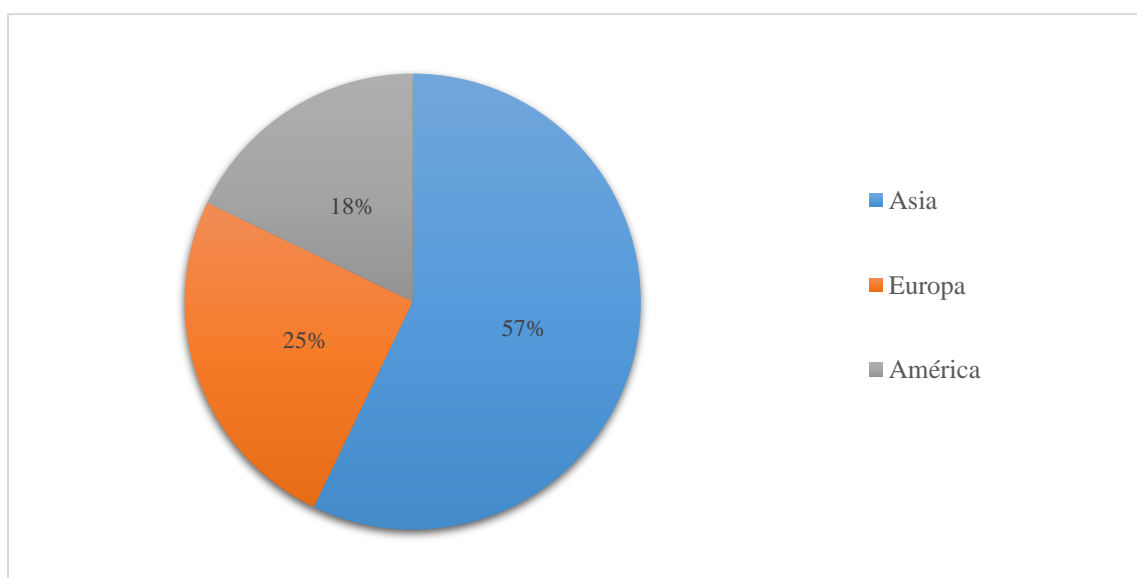
Proceso de selección de artículos para la revisión sistémica con el enfoque PRISMA de los artículos sobre la degradación del PS por los insectos y microorganismos asociados publicados durante 2015-2021.



*Formato tomado de Page et al. (2021)

Figura 2

Frecuencia de artículos sobre insectos degradadores de poliestireno publicados en América, Asia y Europa, 2015-2021.



Nota. Elaboración propia

Los insectos del orden Coleóptera se reportaron como degradadores de PS en el 89 % de artículos científicos publicados en América, Asia y Europa y los insectos del orden Lepidóptera en el 11 % de éstos (Figura 3). Los Coleópteros se reportaron en todos los artículos de América; en el 87,5 % de Asia y 85,7 % de Europa. A su vez, los Lepidópteros se reportaron en el 14,3 % de publicaciones de Europa; en el 12,5 % de Asia y no se encontraron reportes en América (Tabla 1).

Los coleópteros de la familia Tenebrionidae reportados como degradadores de poliestireno fueron: *Tenebrio molitor*, *T. obscurus*, *Tribolium castaneum*, *Plesiophthalmus davidis*, *Zophobas morio*, *Zophobas atratus*, *Uloma* sp. y *Alphitobius diaperinus*. A su vez, el Lepidóptero de la familia Pyralidae fue *Galleria mellonella* (Tabla 2). *T. molitor* fue el coleóptero reportado en América, Asia y Europa durante 2015-2021; *Z. morio* en Asia y América; *G. mellonella* en Asia y Europa; *T. castaneum*, *T. obscurus*, *Z. atratus*, *Uloma* sp. y *P. davidis* en Asia y *A. diaperinus* en Europa (Tablas 3, 4, 5).

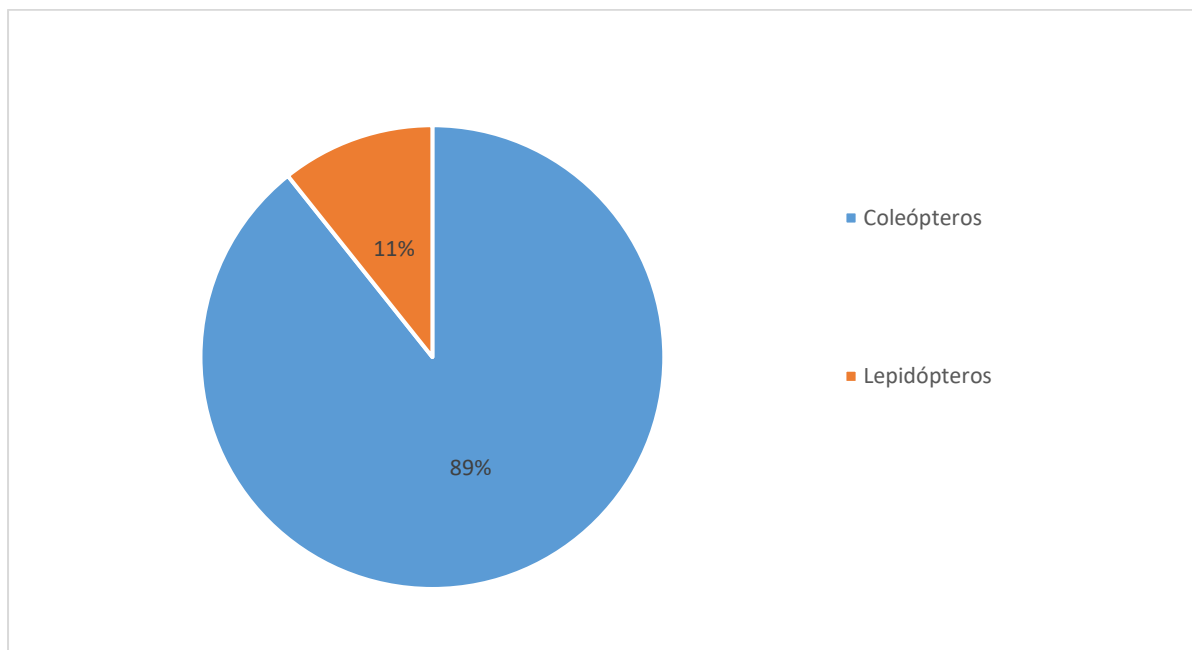
Tenebrio molitor se reportó como degradador de poliestireno en el mayor número de publicaciones (64 %) de América, Asia y Europa durante 2015-2021, correspondiente al 55 % de países de procedencia de las publicaciones. Las otras especies de insectos se reportaron en el 11, 7 y 4 % de las publicaciones correspondientes a 9-5 % de los países investigados (Tablas 6, 7). En este contexto, la frecuencia de las especies de insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021 fue de 61,1 % (*T. molitor*); 8,3 % (*Z. atratus*), 8,3 % (*G. mellonella*), 8,3 % (*Z. morio*) y 2,8 % en *T. castaneum*, *Uloma* sp., *P. davidis*, *A. diaperinus* y *T. obscurus* (Figura 4).

4.2.1. Características taxonómicas de los insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

Los insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021 pertenecen al Reino animalia, Phylum Artrópoda, Subphylum Hexápoda, Clase Insecta, Subclase Pterygota, Órdenes Coleóptera y Lepidóptera. En el Orden Coleóptera, Suborden Polyphaga, Superfamilia Tenebrionoidea, Familia Tenebrionidae y Subfamilia Tenebrioninae, están el género *Uloma* y las especies *Tenebrio molitor*, *T. obscurus*, *Zophobas morio*, *Z. atratus*, *Tribolium castaneum*, *Alphitobius diaperinus* y *Plesiophthalmus davidis*. En el Orden Lepidóptera, Suborden Glossata, Superfamilia Pyraloidea, Familia Pyralidae y Subfamilia Gallerinae está la especie *Galleria mellonella* (Tabla 8).

Figura 3

Frecuencia de reportes de coleópteros y lepidópteros como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.



Nota. Elaboración propia

Tabla 1

Órdenes de insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

Continente	Artículos publicados (total)	Artículos con reportes			
		Coleópteros		Lepidópteros	
		Nº	%	Nº	%
América	5	5	100,0	0	0,0
Asia	16	14	87,5	2	12,5
Europa	7	6	85,7	1	14,3
Total	28	25		3	

Nota. Elaboración propia

Tabla 2

Características taxonómicas de los insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021

Orden	Familia	Especie
Coleoptera	Tenebrionidae	<i>Tenebrio molitor</i>
Coleoptera	Tenebrionidae	<i>Tenebrio obscurus</i>
Coleoptera	Tenebrionidae	<i>Tribolium castaneum</i>
Coleoptera	Tenebrionidae	<i>Plesiophthalmus davidis</i>
Coleoptera	Tenebrionidae	<i>Zophobas morio</i>
Coleoptera	Tenebrionidae	<i>Zophobas atratus</i>
Coleoptera	Tenebrionidae	<i>Uloma</i> sp.
Coleoptera	Tenebrionidae	<i>Alphitobius diaperinus</i>
Lepidoptera	Pyralidae	<i>Galleria mellonella</i>

Nota. Elaboración propia

Tabla 3

Especies de insectos reportadas como degradadoras de poliestireno en América, 2015-2021

Autor y año	País	Nombre científico	Nombre común
Medeiros et al. (2018)	Brasil	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Medeiros et al. (2018)	Brasil	<i>Zophobas morio</i>	Gusano rey
Brandon et al. (2021)	EE. UU	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Peña et al. (2020)	Colombia	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Palmer et al. (2021)	EE. UU	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Vera et al. (2021)	México	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina

Nota. Elaboración propia

Tabla 4*Especies de insectos reportadas como degradadoras de poliestireno en Asia, 2015-2021*

Autor y año	Lugar	Nombre científico	Nombre común
Yang et al. (2015a)	China	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Yang et al. (2015b)	China	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Nukmal et al. (2018)	Indonesia	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Yang et al. (2018a)	China	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Yang et al. (2018b)	China	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Peng et al. (2019)	China	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Peng et al. (2019)	China	<i>Tenebrio obscurus</i>	-
Peng et al. (2020)	China	<i>Zophobas atratus</i>	Super gusano
Lou et al. (2020)	China	<i>Galleria mellonella</i>	Gusano de la cera
Yang et al. (2020)	China	<i>Zophobas atratus</i>	Escarabajo gigante
Woo et al. (2020)	Korea	<i>Plesiophthalmus davidis</i>	-
Wang et al. (2020b)	China	<i>Tribolium castaneum</i>	Gorgojo castaño
Lou et al. (2021)	China	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Jiang et al. (2021b)	China	<i>Galleria mellonella</i>	Gusano de la cera
Jiang et al. (2021b)	China	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Jiang et al. (2021b)	China	<i>Zophobas atratus</i>	Escarabajo gigante
Han et al. (2021)	Taiwán	<i>Zophobas morio</i>	Gusano rey
Han et al. (2021)	Taiwán	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Kundungal et al. (2021)	India	<i>Uloma</i> sp.	-
Huang et al. (2021)	Singapur	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina

Nota. Elaboración propia**Tabla 5***Especies de insectos reportadas como degradadoras de poliestireno en Europa, 2015-2021*

Autor y año	País	Nombre científico	Nombre común
Leluk et al. (2017)	Polonia	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Tsochatzis et al. (2020)	Dinamarca	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Billen et al. (2020)	Bélgica	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Billen et al. (2020)	Bélgica	<i>Galleria mellonella</i>	Gusano de la cera
Cucini et al. (2020)	Italia	<i>Alphitobius diaperinus</i>	Escarabajo de granos
Matyja et al. (2020)	Polonia	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Urbanek et al. (2020)	Polonia	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina
Tsochatzis et al. (2021a)	Dinamarca	<i>Tenebrio molitor</i>	Gusano de la harina

Nota. Elaboración propia

Tabla 6

Frecuencia de especies de insectos reportadas como degradadoras de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021

Géneros	Especies	Artículos publicados	
		Nº	%
<i>Tenebrio</i>	<i>Tenebrio molitor</i>	18	64
<i>Zophobas</i>	<i>Zophobas atratus</i>	3	11
<i>Galleria</i>	<i>Galleria mellonella</i>	2	7
<i>Zophobas</i>	<i>Zophobas morio</i>	1	4
<i>Tribolium</i>	<i>Tribolium castaneum</i>	1	4
<i>Uloma</i>	<i>Uloma</i> sp.	1	4
<i>Plesiophthalmus</i>	<i>Plesiophthalmus davidis</i>	1	4
<i>Alphitobius</i>	<i>Alphitobius diaperinus</i>	1	4
<i>Total</i>		28	100

Nota. Elaboración propia

Tabla 7

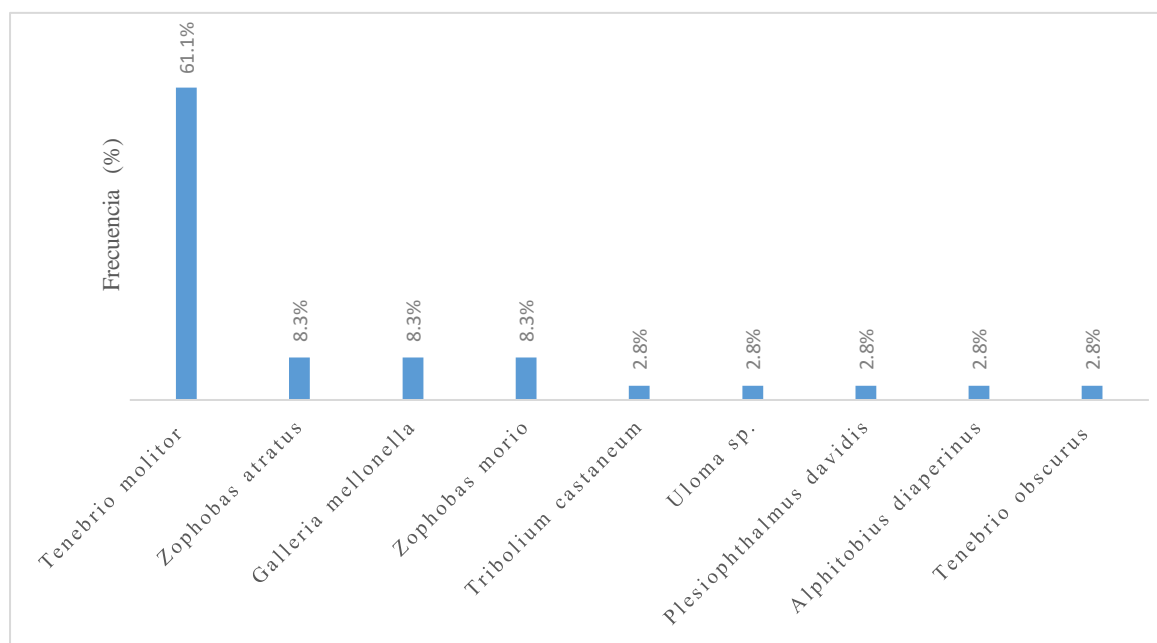
Especies de coleópteros y lepidópteros reportadas en diferentes países como degradadoras de poliestireno en Asia, América y Europa, 2015-2021

Orden	Especies	Países	%
Coleoptera	<i>Tenebrio molitor</i>	12	55
Lepidoptera	<i>Galleria mellonella</i>	2	9
Coleoptera	<i>Zophobas morio</i>	2	9
Coleoptera	<i>Zophobas atratus</i>	1	5
Coleoptera	<i>Tribolium castaneum</i>	1	5
Coleoptera	<i>Uloma</i> sp.	1	5
Coleoptera	<i>Plesiophthalmus davidis</i>	1	5
Coleoptera	<i>Alphitobius diaperinus</i>	1	5
Coleoptera	<i>Tenebrio obscurus</i>	1	5
<i>Total</i>		22	100%

Nota. Elaboración propia

Figura 4

Frecuencia de especies de insectos reportadas como degradadoras de poliestireno en América Asia y Europa, 2015-2021.



Nota. Elaboración propia

Tabla 8

Características taxonómicas de los insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021

Reino	Phylum	Subphylum	Clase	Subclase	Orden	Suborden	Superfamilia	Familia	Subfamilia	Género y especie
Animalia	Arthropoda	Hexápoda	Insecta	Pterygota	Coleóptera	Polyphaga	Tenebrionoidea	Tenebrionidae	Tenebrioninae	<i>Tenebrio molitor</i>
										<i>Tenebrio obscurus</i>
										<i>Zophobas morio</i>
										<i>Zophobas atratus</i>
										<i>Tribolium castaneum</i>
										<i>Alphitobius diaperinus</i>
										<i>Plesiophthalmus</i>
										<i>Uloma</i> sp.
Reino	Phylum	Subphylum	Clase	Subclase	Orden	Suborden	Superfamilia	Familia	Subfamilia	Género y especie
Animalia	Arthropoda	Hexápoda	Insecta	Pterygota	Lepidóptera	Glosata	Pyraloidea	Pyralidae	Gallerinae	<i>Galleria mellonella</i> L.

Nota. Elaboración propia

4.2.2. Características morfológicas de los insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

Los Coleópteros presentan los cuerpos endurecidos, el aparato bucal mandibulado, los ojos compuestos y los ocelos generalmente ausentes. El protórax es grande y móvil, el meso y metatórax están fusionados y el primer par de alas se han endurecido para proteger al segundo par membranoso (Jiménez, 2020). Los Coleópteros de la familia Tenebrionidae (Figura 5) presentan los ojos separados en dos partes, las antenas en su mayoría con 11 segmentos y el pronoto carenado o explanado (Aalbu et al., 2002).

Los coleópteros del género *Tenebrio* miden más de 10 mm de largo, son de color negro o marrón oscuro, el protórax grande y movable, los élitros duros y córneos y el intersticio con setas y tibia de la parte anterior doblada hacia adentro. *Tenebrio molitor* es de color marrón oscuro, mide 12-18 mm, tiene protórax finamente punteado, antenas filiformes, élitros con estrías longitudinales y el abdomen está formado por un total de nueve segmentos, cuya forma es cilíndrica con excepción del último segmento (Gallego, 2020). *Tenebrio obscurus* es de color mate, mide 13,5-18 mm, el pronoto es más cuadrado y las esquinas son más agudas, el palpo maxilar es grueso y el tercer artejo es más grueso que los anteriores, que se mantienen más o menos igual de anchos en todo su recorrido (Pradera, 2019; Hagstrum, 2013).

El género *Tribolium* es oblongo de color marrón con 5 mm o menos de longitud. *Tribolium castaneum* es cosmopolita, de forma alargada y ligeramente plana, de color rojizo a marrón, de 3 a 4 mm de longitud, los tres últimos segmentos de sus antenas son marcadamente más grandes que los demás, los élitros presentan surcos longitudinales bien marcados y con numerosas puntuaciones (Mari, 2015).

El género *Zophobas* puede ser bicolor negro y rojizo, presentar patrones de manchas dorsales de color castaño o rojizas o ser totalmente negro o castaño rojizos. *Zophobas morio* mide 12-17 mm de longitud y 4 mm de ancho, de color negro opaco, robusto y de rápido desplazamiento, tiene fuertes mandíbulas y tarsos con uñas, cabeza prognata, las antenas color pardo más claro, muy cortas y con artejos engrosados, élitros estriados punteadas (Mondragón, 2021).

Figura 5

Adultos de Coleópteros Tenebrio molitor (a), T. obscurus (b), Zophobas morio (c), Z. atratus (d), Tribolium castaneum (e), Alphitobius diaperinus (f), Plesiophthalmus davidis (g) y Uloma sp. (h), reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.



a



b



c



d



e



f



g



h

a: USDA (2016)

b: Calmont (2008)

c: Nadein et al. (2021)

d: Úbeda et al. (2020)

e: Khan et al. (2016)

f: Oromí (2018)

g: Ivanov (2007)

h: Ando et al. (2017)

Los Coleópteros del género *Alphitobius* son ovalados, convexos, negros y de apariencia brillante. *A. diaperinus* mide 6 mm, tiene la cabeza emarginada en el frente, un surco clipeal distintivo y la superficie está perforada en forma tosca, los ojos también están marginados, las antenas están cubiertas con pelos cortos de color amarillo, tiene tres escleritos axilares definidos, con dos bandas negras transversales sobre los élitros y de color marrón rojizo, una más ancha en la parte media y la otra más angosta casi al final de los élitros, el abdomen con nueve segmentos, el esternón visible y el clípeo con ápice redondeado (Monteys, 2011).

Los coleópteros del género *Plesiophthalmus* presentan un cuerpo de tamaño mediano (12-19 mm), oblongo ovalado; negro pardusco con superficie dorsal notablemente mate o color amarillo-rojizo y los ojos son grandes. *Plesiophthalmus davidis* mide 17 mm, color negro sedoso muy tenuemente bronceado, mate, con pelos blancos trenzados a los lados, patas brillantes, la cabeza con finas vellosidades grisáceas, las antenas sobrepasan la mitad del cuerpo, el mentón es lingüiforme, los élitros visibles con líneas inclinadas y el abdomen finamente punteado con seis segmentos (Masumoto, 2009).

Los Lepidópteros presentan el cuerpo cubierto de escamas, el aparato bucal tipo tubo de sifón con probosis larga y enrollada, dos pares de alas y antenas clavadas o no clavadas. Los Lepidópteros de la familia Pyralidae (Figura 6) tienen palpos labiales grandes que se proyectan adelante en forma de una nariz, las alas son mesotorácicas con la vena M2 cerca de la vena M3 y sus antenas son filiformes (Jiménez, 2020). La especie *Galleria melonella* es de color rosa a crema y al blanco, con alas delanteras parduscas, una envergadura de 25mm, palpos labiales bien desarrollados que se extienden hacia adelante frente a la cara, ojos compuestos grandes, tímpanos en el esternito anterior del abdomen y la nervadura del ala trasera está reducida (Triplehorn y Johnson, 2005). Tanto las larvas de Coleópteros y Lepidópteros (Figuras 7, 8) tienen la capacidad de degradar el PS con la ayuda de microorganismos intestinales.

Figura 6

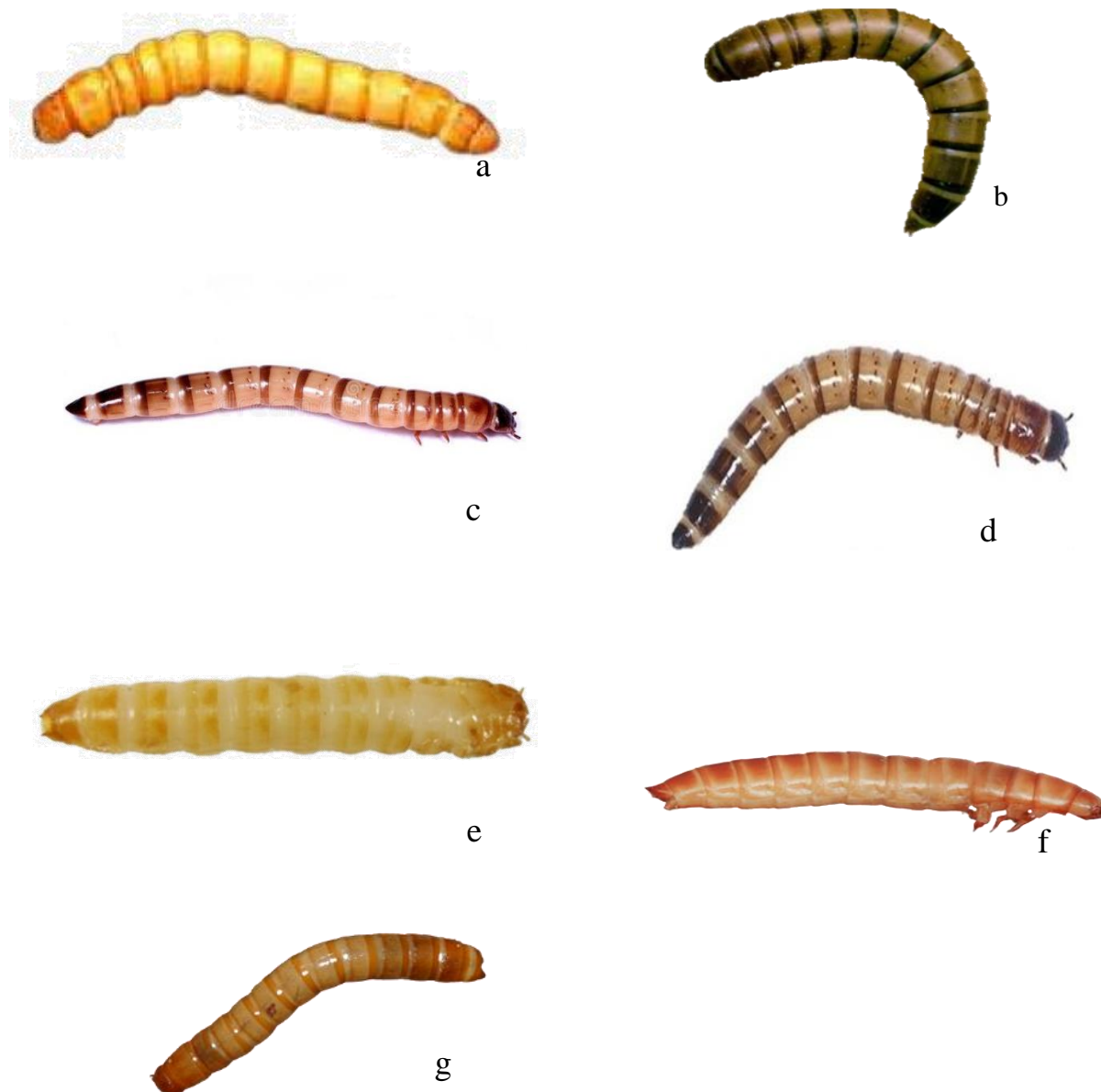
*Adulto de Galleria mellonella**, reportado como degradador de poliestireno en Asia y Europa, 2015-2021.



*Ellis et al. (2013)

Figura 7

Larvas de Coleópteros *Tenebrio molitor* (a), *T. obscurus* (b), *Zophobas morio* (c), *Z. atratus* (d), *Tribolium castaneum* (e), *Alphitobius diaperinus* (f) y *Uloma* sp. (g), reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.



a: Bin et al. (2014)

b: Pradera (2019)

c: Pratondo y Bramantoro (2022)

d: Geum y Jung (2015)

e: Drury et al. (2011)

f: Valls (2012)

g: Murray (2006)

Figura 8

*Larva de Galleria mellonella**, reportado como degradador de poliestireno en Asia y Europa, 2015-2021.



*Ellis et al. (2013)

4.3. Características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos asociados a los insectos degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021

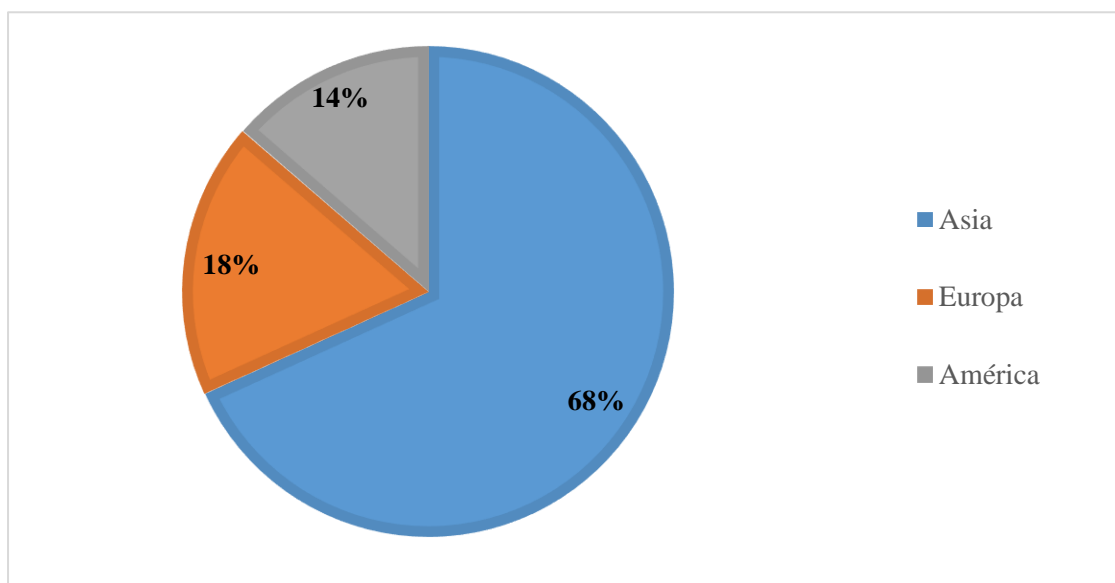
La frecuencia de artículos sobre microorganismos asociados a insectos degradadores de poliestireno, durante 2015-2021 fue de 68 % en Asia, 18 % en Europa y 14 % en América (Figura 9). Las bacterias fueron predominantes en el 89 % de las publicaciones sobre microorganismos asociados a los insectos degradadores de PS en comparación a 11 % de los hongos (Figura 10). Entre las bacterias predominaron (68 %) las Gram negativas (Figura 11) y en cuanto a la morfología bacteriana predominaron los bacilos (76 %) y en menor frecuencia los cocos en (16 %), bacilos y espiralados con 4 % respectivamente (Figura 12).

En Asia, los géneros de bacterias asociados a las larvas de insectos degradadores de poliestireno durante 2015-2021, fueron *Pantoea*, *Klebsiella*, *Massilia*, *Enterococcus*, *Kluyvera*, *Lactococcus*, *Escherichia*, *Shigella*, *Serratia*, *Enterobacter*, *Bifidobacterium*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Cronobacter*, *Bacillus*, *Alcaligenes* y *Exiguobacterium* (Tabla 9) y en América, *Enterococcus*, *Serratia*, *Klebsiella*, *Citrobacter*, *Stenotrophomonas*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Pantoea* y *Erwinia* (Tabla 10). En Europa se reportaron los géneros de bacterias *Clostridium*, *Flavobacterium*, *Enterobacter*, *Lactococcus*, *Enterococcus*, *Spiroplasma*, *Streptococcus*, *Erwinia*, *Serratia*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Cronobacter*, *Stenotrophomonas* y *Kocuria* y los géneros de hongos *Aspergillus*, *Hyphodermella* y *Trichoderma* (Tabla 11). El género *Enterococcus* se reportó en forma independiente en cuatro especies de insectos; *Klebsiella*, *Serratia*, *Acinetobacter* y *Pseudomonas* asociados a tres insectos, *Lactococcus*, *Bacillus*, *Cronobacter*, *Enterobacter*, *Lactococcus*, *Pantoea* y *Stenotrophomonas* asociados a dos insectos y la mayoría de los géneros bacterianos se asoció a un insecto. Por su parte, los tres géneros de hongos se asociaron a un insecto (Tabla 12).

El género *Pseudomonas* se reportó en el 12 % de publicaciones, *Enterococcus* en el 10 %, *Klebsiella* en el 8 %, *Bacillus*, *Enterobacter* y *Lactococcus* 7 % *Acinetobacter*, *Stenotrophomonas*, *Serratia* y *Erwinia* en el 7 %, *Cronobacter* y *Pantoea* en el 5 % y los otros géneros se reportaron en el 3 % de publicaciones respectivamente (Tabla 13).

Figura 9

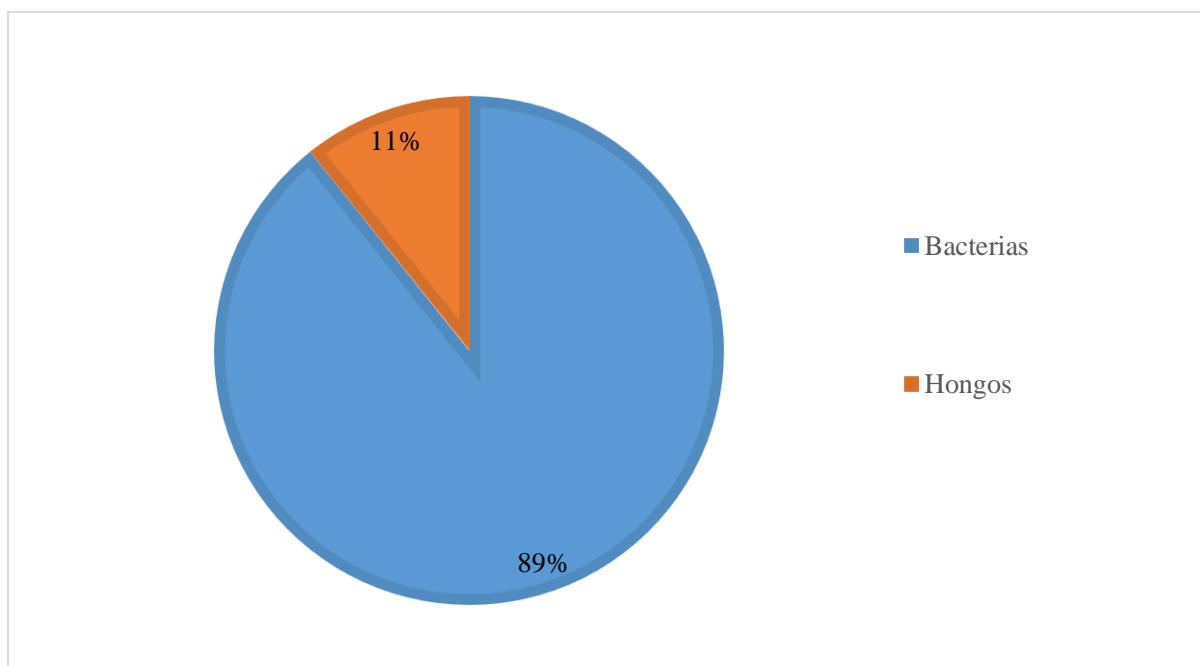
Frecuencia de artículos sobre microorganismos asociados a insectos degradadores de poliestireno publicados en América, Asia y Europa, 2015-2021.



Nota. Elaboración propia

Figura 10

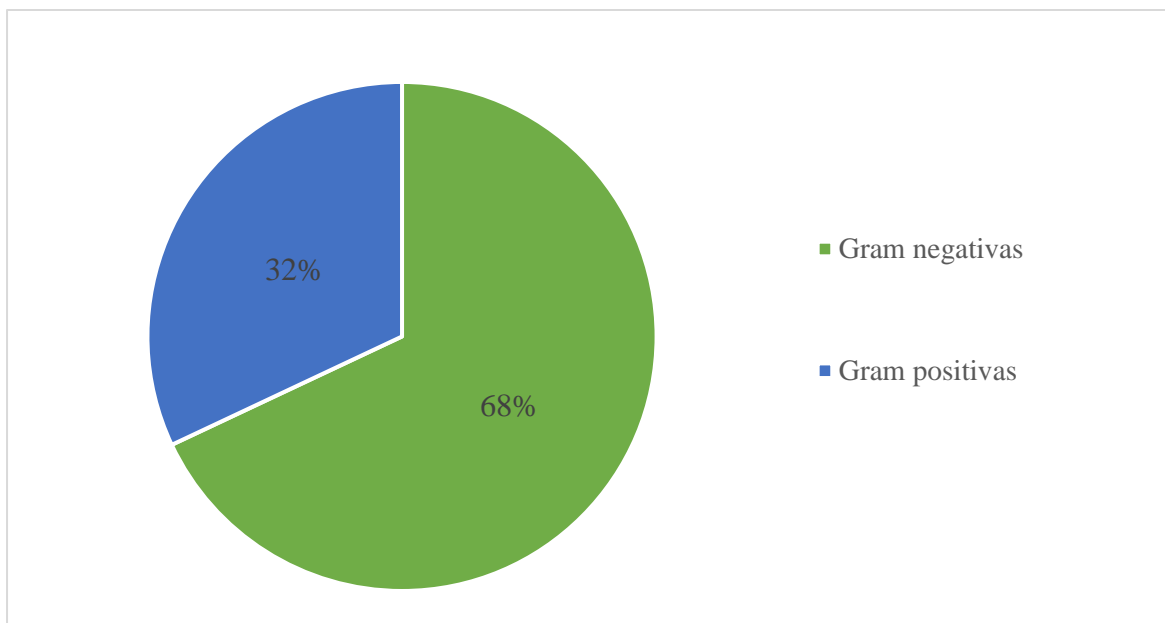
Frecuencia de bacterias y hongos asociados a larvas de insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.



Nota. Elaboración propia

Figura 11

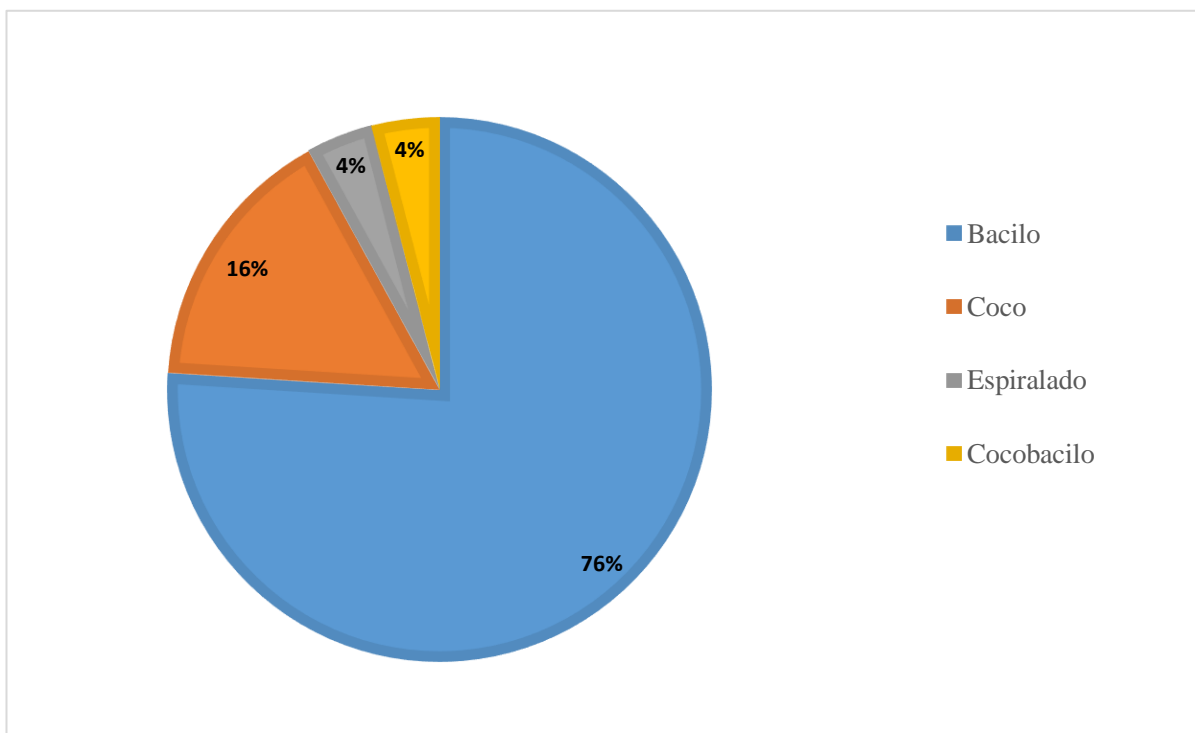
Frecuencia de bacterias Gram positivas y Gram negativas asociadas a larvas de insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.



Nota. Elaboración propia

Figura 12

Frecuencia de bacterias según su morfología asociadas a larvas de insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021.



Nota. Elaboración propia

Tabla 9

Bacterias asociadas a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en Asia, 2015-2021

Autor	Insecto	Bacterias
Bae et al. (2021)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Cronobacter sakazakii</i> , <i>Lactococcus garvieae</i>
Han y Han. (2021)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Pantoea agglomerans</i>
Han y Han. (2021)	<i>Zophobas morio</i>	<i>Klebsiella pneumoniae</i>
Jiang et al. (2021a)	<i>Galleria mellonella</i>	<i>Massilia</i> sp.
Jiang et al. (2021b)	<i>Zophobas atratus</i>	<i>Enterococcus</i> sp., <i>Kluyvera</i> sp., <i>Lactococcus</i> sp.
Jiang et al. (2021b)	<i>Galleria mellonella</i>	<i>E. coli</i> , <i>Shigella</i> sp., <i>Serratia</i> sp., <i>Enterobacter</i> sp.
Jiang et al. (2021b)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Enterococcus</i> sp.
Tan et al. (2021a)	<i>Zophobas morio</i>	<i>Bacillus megaterium</i>
Tan et al. (2021b)	<i>Zophobas morio</i>	<i>Bacillus aryabhattai</i> , <i>Bacillus megaterium</i>
Lou et al. (2021)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Bifidobacterium</i> sp., <i>Acinetobacter</i> sp., <i>Streptococcus</i> sp.
Lou et al. (2020)	<i>Galleria mellonella</i>	<i>Enterococcus</i> sp.
Min et al. (2020)	<i>Zophobas atratus</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Rae et al. (2020)	<i>Zophobas atratus</i>	<i>Pseudomonas</i> sp.
Wang et al. (2020b)	<i>Tribolium castaneum</i>	<i>Acinetobacter vivianii</i>
Woo et al. (2020)	<i>Plesiophthalmus davidis</i>	<i>Serratia</i> sp.
Peng et al. (2019)	<i>Tenebrio obscurus</i>	<i>Enterococcus</i> sp.
Peng et al. (2019)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Enterobacter</i> sp.
Long et al. (2017)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Alcaligenes</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.
Long et al. (2017)	<i>Zophobas morio</i>	<i>Acinetobacter</i> sp., <i>Klebsiella</i> sp.
Yang et al. (2015b)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Exiguobacterium</i> sp.

Nota. Elaboración propia

Tabla 10

Bacterias asociadas a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, 2015-2021

Autor	Insecto	Bacterias
Vera et al. (2021)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>
Brandon et al. (2021)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Serratia marcescens</i> , <i>Klebsiella aerogenes</i> , <i>Citrobacter freundis</i> , <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> , <i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterobacter asburiae</i> .
Peña et al. (2020)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Bacillus anthracis</i> , <i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Pantoea agglomerans</i> , <i>Erwinia persicina</i>

Nota. Elaboración propia

Tabla 11

Microorganismos asociados a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en Europa, 2015-2021

Autor	Insecto	Microorganismos
Urbanek et al. (2020)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Clostridium</i> sp., <i>Flavobacterium</i> sp., <i>Enterobacter</i> sp., <i>Lactococcus</i> sp., <i>Enterococcus</i> sp., <i>Spiroplasma</i> sp., <i>Streptococcus</i> sp., <i>Serratia marcescens</i> , <i>Klebsiella oxytoca</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Cucini et al. (2021)	<i>Alphitobius diaperinus</i>	<i>Klebsiella</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Stenothrophomonas</i> sp.
Tsochatzis et al. (2021b)	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Erwinia oleae</i> , <i>Lactococcus lactis</i> , <i>Lactococcus garviae</i>
Cucini et al. (2020)	<i>Alphitobius diaperinus</i>	Bacterias: <i>Cronobacter</i> sp., <i>Kocuria</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp. Hongos: <i>Aspergillus</i> , <i>Hyphodermella</i> , <i>Trichoderma</i>

Nota. Elaboración propia

Tabla 12

Géneros de bacterias y hongos asociados a los insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

Género de bacterias y hongos	Insectos
<i>Enterococcus</i>	<i>Galleria mellonella</i> , <i>Zophobas atratus</i> , <i>Tenebrio molitor</i> , <i>Tenebrio obscurus</i>
<i>Klebsiella</i>	<i>Tenebrio molitor</i> , <i>Zophobas morio</i> , <i>Alphitobius diaperinus</i>
<i>Serratia</i>	<i>Tenebrio molitor</i> , <i>Galleria mellonella</i> , <i>Plesiophthalmus davidis</i>
<i>Acinetobacter</i>	<i>Tribolium castaneum</i> , <i>Tenebrio molitor</i> , <i>Zophobas morio</i>
<i>Pseudomonas</i>	<i>Tenebrio molitor</i> , <i>Alphitobius diaperinus</i> , <i>Zophobas atratus</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Tenebrio molitor</i> , <i>Zophobas morio</i>
<i>Cronobacter</i>	<i>Alphitobius diaperinus</i> , <i>Tenebrio molitor</i>
<i>Enterobacter</i>	<i>Galleria mellonella</i> , <i>Tenebrio molitor</i>
<i>Lactococcus</i>	<i>Tenebrio molitor</i> , <i>Zophobas atratus</i>
<i>Pantoea</i>	<i>Tenebrio molitor</i> , <i>Zophobas morio</i>
<i>Stenotrophomonas</i>	<i>Tenebrio molitor</i> , <i>Alphitobius diaperinus</i>
<i>Kocuria</i>	<i>Alphitobius diaperinus</i>
<i>Kluyvera</i>	<i>Zophobas atratus</i>
<i>Escherichia</i>	<i>Galleria mellonella</i>
<i>Shigella</i>	<i>Galleria mellonella</i>
<i>Massilia</i>	<i>Galleria mellonella</i>
<i>Bifidobacterium</i>	<i>Tenebrio molitor</i>
<i>Exiguobacterium</i>	<i>Tenebrio molitor</i>
<i>Streptococcus</i>	<i>Tenebrio molitor</i>
<i>Alcaligenes</i>	<i>Tenebrio molitor</i>
<i>Citrobacter</i>	<i>Tenebrio molitor</i>
<i>Erwinia</i>	<i>Tenebrio molitor</i>
<i>Clostridium</i>	<i>Tenebrio molitor</i>
<i>Flavobacterium</i>	<i>Tenebrio molitor</i>
<i>Spiroplasma</i>	<i>Tenebrio molitor</i>
Hongos	
<i>Aspergillus</i>	<i>Alphitobius diaperinus</i>
<i>Hyphodermella</i>	<i>Alphitobius diaperinus</i>
<i>Trichoderma</i>	<i>Alphitobius diaperinus</i>

Nota. Elaboración propia

Tabla 13

Frecuencia de publicaciones en los que se reportaron los diferentes géneros de bacterias asociados a los insectos degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021

Géneros de bacterias	Publicaciones	
	Nº	%
<i>Pseudomonas</i>	7	12
<i>Enterococcus</i>	6	10
<i>Klebsiella</i>	5	8
<i>Lactococcus</i>	4	7
<i>Enterobacter</i>	4	7
<i>Bacillus</i>	4	7
<i>Stenotrophomonas</i>	3	5
<i>Erwinia</i>	3	5
<i>Acinetobacter</i>	3	5
<i>Serratia</i>	3	5
<i>Cronobacter</i>	2	3
<i>Pantoea</i>	2	3
<i>Kocuria</i>	1	2
<i>Kluyvera</i>	1	2
<i>Escherichia</i>	1	2
<i>Shigella</i>	1	2
<i>Massilia</i>	1	2
<i>Bifidobacterium</i>	1	2
<i>Exiguobacterium</i>	1	2
<i>Streptococcus</i>	1	2
<i>Alcaligenes</i>	1	2
<i>Citrobacter</i>	1	2
<i>Clostridium</i>	1	2
<i>Flavobacterium</i>	1	2
<i>Spiroplasma</i>	1	2

Nota. Elaboración propia

4.3.1. Características taxonómicas de los microorganismos asociados a los insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

Las bacterias asociadas a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021 pertenecen al Dominio Bacteria y los Phylum Firmicutes, Bacteroidetes, Proteobacteria, Actinobacteria y Tenericutes (Tabla 14, anexo 2). En el Phylum Firmicutes se encuentran dos Clases: Bacilli y Clostridia. La Clase Bacilli agrupa los órdenes Bacillales y Lactobacillales. En el orden Bacillales están las familias Bacillaceae con las especies *Bacillus anthracis*, *B. megaterium*, *B. aryabhattai*, *B. thuringiensis* y la Familia Incertae Sedis XII con el género *Exiguobacterium* (Cavanaugh et al., 2021; Vos et al., 2010; Noel et al., 2010). En el orden Lactobacillales está la Familia Enterococcaceae (*Enterococcus faecalis*), Familia Streptococcaceae (*Streptococcus* sp., *Lactococcus garvieae* y *L. lactis*) (Toit et al., 2014; Lori, 2014). Por su parte, la Clase Clostridia, agrupa al Orden Clostridiales, Familia Clostridiaceae y género *Clostridium* (Wiegel, 2015). En el Phylum Bacteroidetes se encuentra la clase Flavobacteriia, Orden Flavobacteriales, Familia Flavobacteriaceae y el género *Flavobacterium* (McBride, 2014).

El Phylum Proteobacteria agrupa dos clases: Gammaproteobacteria y Betaproteobacteria. La Clase Gammaproteobacteria incluye los Órdenes Enterobacteriales, Pseudomonadales y Xanthomonadales. El Orden Enterobacteriales incluye a las familias Enterobacteriaceae y Erwiniaceae. La familia Enterobacteriaceae presenta los géneros *Kluyvera* y *Shigella* y las especies *Pantoea agglomerans*, *Klebsiella aerogenes*, *K. oxytoca*, *K. pneumoniae*, *Escherichia coli*, *Serratia marcescens*, *Enterobacter asburiae*, *Citrobacter freundii* y *Cronobacter sakazakii* (Faizal et al., 2020; Lopardo et al., 2016; Octavia, 2014). La familia Erwiniaceae incluye a *Erwinia persicina* y *E. oleae* (Yao et al., 2022)

Tabla 14

Taxonomía de bacterias asociados a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021

Dominio	Phylum	Clase	Orden	Familia	Género/Especie
Bacteria	Firmicutes	Bacilli	Bacillales	Bacillaceae	<i>Bacillus anthracis</i>
					<i>B. megaterium</i>
					<i>B. aryabhatai</i>
					<i>B. thuringiensis</i>
					<i>Exiguobacterium</i> sp.
		Bacilli	Bacillales	Incertae Sedis XII	<i>Enterococcus faecalis</i>
		Bacilli	Lactobacillales	Enterococcaceae	<i>Streptococcus</i> sp.
	Bacteroidetes	Bacilli	Lactobacillales	Streptococcaceae	<i>Lactococcus garvieae</i>
		Bacilli	Lactobacillales	Streptococcaceae	<i>L. lactis</i>
		Clostridia	Clostridiales	Clostridiaceae	<i>Clostridium</i> sp.
		Flavobacteriia	Flavobacteriales	Flavobacteriaceae	<i>Flavobacterium</i> sp.
					<i>Pantoea agglomerans</i>
					<i>Klebsiella aerogenes</i>
					<i>K. oxytoca</i>
					<i>K. pneumoniae</i>
					<i>Kluyvera</i> sp.
					<i>Escherichia coli</i>
					<i>Serratia marcescens</i>
					<i>Enterobacter asburiae</i>
					<i>Shigella</i> sp.
	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacteriales	Enterobacteriaceae	<i>Citrobacter freundii</i>
					<i>Cronobacter sakazakii</i>
					<i>Erwinia persicina</i>
					<i>E. oleae</i>
				Erwiniaceae	<i>Acinetobacter vivianii</i>
					<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
					<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>
					<i>Massilia</i> sp.
					<i>Alcaligenes</i> sp.
		Actinobacteria	Bifidobacteriales	Bifidobacteriaceae	<i>Bifidobacterium</i> sp.
	Actinobacteria	Actinobacteria	Actinomycetales	Micrococcaceae	<i>Kocuria</i> sp.
	Tenericutes	Mollicutes	Entomoplasmatales	Spiroplasmataceae	<i>Spiroplasma</i> sp.

* Datos tomados de Williams., W. (1984). Manual de bacteriología determinativa de Bergey

El orden Pseudomonadales agrupa las familias Moraxellaceae con la especie *Acinetobacter vivianii* y la Familia Pseudomonadaceae con la especie *Pseudomonas aeruginosa* (Lalucat et al., 2020; Towner, 2006). El orden Xanthomonadales incluye la Familia Xanthomonadaceae y la especie *Stenotrophomonas maltophilia* (Teixeira y Merquior, 2014). Por su parte, la Clase Betaproteobacteria considera el Orden Burkholderiales con la Familia Oxalobacteraceae y el género *Massilia* y la Familia Alcaligenaceae y el género *Alcaligenes* (Sedláček et al., 2022; Austin, 2014). El Phylum Actinobacteria, Clase Actinobacteria orden Bifidobacteriales, incluye a la Familia Bifidobacteriaceae y género *Bifidobacterium* y el orden Actinomycetales, la Familia Micrococcaceae y el género *Kocuria* (Felis y Dellaglio, 2014; Kandi, 2016). El Phylum Tenericutes, Clase Mollicutes, orden Entomoplasmatales y Familia Spiroplasmataceae incluye al género *Spiroplasma* (Regassa, 2014).

Por su parte los hongos asociados a las larvas de insectos degradadores de poliestireno (Tabla 15) está el Reino Fungi, división Ascomycota y Basidiomycota. En la división Ascomycota se considera la subdivisión Pezizomycotina, Clase Sordariomycetes, Subclase Hypocreomycetidae, Orden *Hypocreales*, Familia Hypocreaceae y el género *Trichoderma*, así como también la Subdivisión Deuteromycotina, Clase Eurotiomycetes, Orden Eurotiales, Familia Aspergillaceae y el género *Aspergillus*. La división Basidiomycota considera la Subdivisión Agaricomycotina, Clase Agaricomycetes, Subclase Incertae Sedis, Orden Polyporales, Familia Phanerochaetaceae y el género *Hyphodermella* (Tsang et al., 2018; Zhao et al., 2017; Martínez et al., 2015; Silva et al., 2011).

4.3.2. Características morfológicas de los microorganismos asociados a las larvas de insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

Las bacterias del género *Bacillus* son ubicuas, con forma de bacilos y forman endosporas resistentes a las condiciones extremas, son Gram positivas, aerobios o anaerobias facultativas, catalasa y oxidasa positivas y la mayoría son móviles con flagelos peritricos. *B. anthracis*, forma colonias no hemolíticas con bordes irregulares y *B. thuringiensis* nativo del suelo, cosmopolita, (Villarreal et al., 2018; Fajardo et al., 2014). Las bacterias del género *Exiguobacterium* son Gram positivas, anaerobios facultativos, móviles, no formadoras de esporas, y distribuidos en ambientes extremófilos (Cavanaugh et al., 2021).

Tabla 15

Taxonomía de hongos asociados a larvas de insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021

Reino	División	Subdivisión	Clase	Subclase	Orden	Familia	Género/Especie
Fungi	Ascomycota	Pezizomycotina	Sordariomycetes	Hypocreomycetidae	Hypocreales	Hypocreaceae	<i>Trichoderma</i> sp.
	Ascomycota	Deuteromycotina	Eurotiomycetes		Eurotiales	Aspergillaceae	<i>Aspergillus</i> sp.
	Basidiomycota	Agaricomycotina	Agaricomycetes	Incertae Sedis	Polyporales	Phanerochaetaceae	<i>Hyphodermella</i> sp.

* Datos tomados de los artículos científicos de Tsang et al., 2018; Zhao et al., 2017; Martínez et al., 2015; Silva et al., 2011

La especie *Enterococcus faecalis* agrupa bacterias con forma de cocos o cadenas cortas, Gram positivas, anaerobios facultativos, inmóviles y no formadores de esporas. Estas bacterias habitan normalmente en el tracto gastrointestinal del hombre y animales. Los géneros *Streptococcus* y *Lactococcus* agrupan a bacterias con forma de cocos en pares o en cadenas, Gram positivos, anaerobios facultativos, oxidasa y catalasa negativos, no móviles y no formadores de esporas. El género *Lactococcus* se diferencia de *Streptococcus* por su capacidad para generar acidez a partir de los carbohidratos (Reyes et al., 2020; Lopardo et al., 2016; Lori, 2014; Toit et al., 2014).

El género *Clostridium* agrupa bacterias de forma de bacilos, formadores de endosporas deformantes, Gram positivos, anaerobios obligados, móviles, catalasa negativos con metabolismo fermentativo. En el Phylum Bacteroidetes está el género *Flavobacterium* con bacterias de forma bacilar, Gram negativas, no formadoras de esporas, aerobias en su mayoría y con pigmentación amarillo-anaranjado (Tall et al., 2020; Wiegel et al., 2006).

La familia Enterobacteriaceae es la predominante en el Phylum Proteobacteria que agrupa bacterias con forma de cocobacilos, Gram negativos, móviles, catalasa positivos, oxidasa negativos, formadores de acidez por fermentación de la glucosa, anaerobios facultativos, no formadores de esporas y reductores del nitrato a nitrito (WatLopardo et al., 2016; Octavia y Lan, 2014). Los fermentadores de lactosa pertenecen a los géneros *Klebsiella*, *Serratia*, *Escherichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Pantoea*, *Cronobacter*, *Kluyvera* y los no fermentadores comprende el género *Shigella* (Mallick et al., 2021; Liu et al., 2020; Watson et al., 2018).

Los géneros *Acinetobacter* y *Pseudomonas* del orden Pseudomonadales son no formadores de esporas con metabolismos respiratorio (Lalucat et al., 2020; Carroll et al., 2016). *Stenotrophomonas maltophilia* se caracteriza porque forma colonias pigmentadas en agar Mackonkey (Ghosh et al., 2020). El género *Massilia* incluye bacterias aerobias estrictas y formadoras de endopigmento azul-púrpura violáceo. El género *Alcaligenes* agrupa bacterias oxidasa y catalasa positivos, aerobios, móviles con flagelos peritricos y reductores de nitrato a nitrito (Sedláček et al., 2022; Austin, 2014).

El Phylum Actinobacteria incluye a *Bifidobacterium* con formas ramificadas, pleomórficas, Gram positivas, no formadores de endosporas, no móviles, anaerobios formadores de acidez, pero no gas y catalasa negativa. El género *Kocuria* incluye a cocos Gram positivas, dispuestos en cadenas pares, cadenas cortas, tétradas o racimo irregular, no formadores de endosporas, catalasa y oxidasa positivo, aerobios (Alessandri et al., 2021; Kandi et al., 2016; Felis y Dellaglio, 2015; Kaur et al., 2011). En el Phylum Tenericutes están el género *Spiroplasma* con bacterias carentes de pared celular y resistentes a la Penicilina, forma helicoidal, móviles, fermentadores de glucosa (Regassa, 2014).

En el Reino Fungi, la familia Hypocreaceae agrupa géneros de hongos en su mayoría con potencial biocontrolador. Las colonias de *Trichoderma* crecen muy rápido con un micelio blanco en el inicio en el cual se observa verde cuando se produce la esporulación. Las conidias asexuales lisas, cilíndricas o subglobosas se forma en células conidiógenas y fiálides ubicadas en los extremos de los conidióforos hialinos muy ramificados y no verticiladas (Gómez et al., 2020; Martínez et al., 2015).

En el género *Aspergillus* se observa el conidióforo formado por un el extremo apical ensanchado o vesícula, la sección cilíndrica debajo de la vesícula o estipe y la unión del conidióforo con el micelio o celular. Sobre la vesícula se observa las fiálides y encima de ellas las métulas que pueden ser uniseriadas o biseriadas y sobre ellos están las conidias catenulados (Tsang et al., 2018; Bennett, 2016).

En el género *Hyphodermella* presenta un himenóforo odontoide, un subiculum y basidiósporas más grandes (4,5-5 a 3,5-4 μ m). Las especies son rizomórficas y se los encuentra en maderas en descomposición (Zhao et al., 2017; Telleria et al., 2010).

4.4. Descripción del mecanismo de degradación del poliestireno por los insectos reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

En todos los reportes analizados se investigó la degradación del PS mediante el consumo del polímero por las larvas de los Coleópteros *Alphitobius diaperinus* (Cucini et al., 2020), *Plesiophthalmus davidis* (Woo et al., 2020), *Tenebrio molitor* (Tsochatzis et al., 2021a; Matyja et al., 2020; Urbanek et al., 2020; Yang et al., 2018; Nukmal et al., 2018), *T. obscurus* (Peng et al., 2019), *Tribolium castaneum* (Wang et al., 2020b), *Uloma* sp. (Kundungal et al., 2021), *Zophobas atratus* (Peng et al., 2020) y *Z. morio* (Han et al., 2021; Medeiros et al., 2018) y el Lepidóptero *Galleria mellonella* (Jiang et al., 2021a).

En el 60 % de las investigaciones se reportó que las larvas de los insectos son capaces de degradar el PS al utilizarlo como única fuente de nutriente, sin ningún suplemento de fácil biodegradabilidad (Figura 13). Por el contrario, en el 40 % de las investigaciones se reportó que las larvas no son capaces de degradar el PS como único alimento y éste debe ser suplementado con sustratos orgánicos fácilmente metabolizados como el salvado de trigo (Yang et al., 2018a), cebada (Tsochatzis et al., 2021b) y cera de abeja (Kundungal et al., 2021).

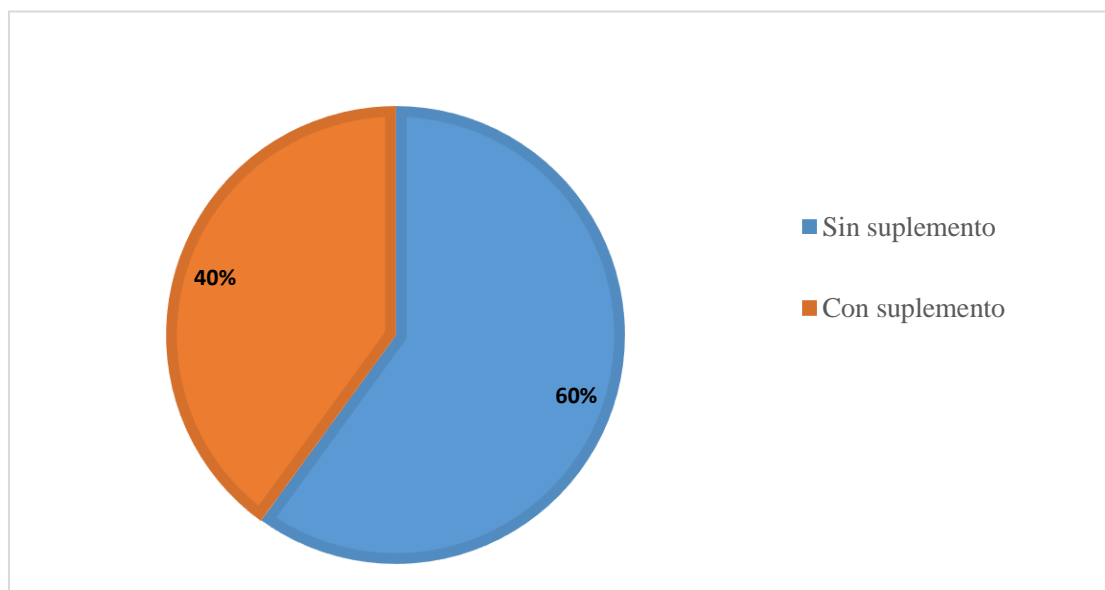
En el 96 % de las investigaciones se demostraron microorganismos en el contenido intestinal y heces de las larvas de insectos reportados como degradadores de PS. El mayor porcentaje (89 %) de publicaciones correspondió a las bacterias y un mínimo porcentaje (11 %) a los hongos (Figura 14). La actividad de los microorganismos en la degradación del PS se verificó con la adición de antibióticos en el 24 % de los reportes analizados (Figura 15) y se reportó disminución del peso de las larvas y ausencia de despolimerización del polímero (Malawi et al., 2021; Lou et al., 2020; Yang et al., 2018a; Yang et al., 2018b; Yang et al., 2015a).

4.5 Técnicas utilizadas para la detección y cuantificación de la degradación del poliestireno por insectos y microorganismos asociados reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

Las técnicas usadas para la detección de la degradación de PS por insectos y microorganismos asociados reportados en 2015-2021 fueron: Microscopía electrónica de barrido (SEM), Microscopía de fluorescencia, Espectrofotometría de dispersión de energía de rayos X(EDS) y Calorimetría diferencial de barrido (DSC), con predominancia de SEM en Asia (82 %), Europa (75 %) y SEM en América (100 %). Las técnicas usadas para la cuantificación de la degradación de PS reportados del 2015-2021 fueron: Termogravimetría (TGA), Cromatografía por permeación en gel (GPC), Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS), Cromatografía de gases/ Espectrometría de masas (CG-TO) y Resonancia magnética nuclear (RMN), con predominio de TGA y FTIR en Asia (25 %), FTIR en América (50 %) y en Europa FTIR 100 % respectivamente (Tablas 16, 17, 18, 19).

Figura 13

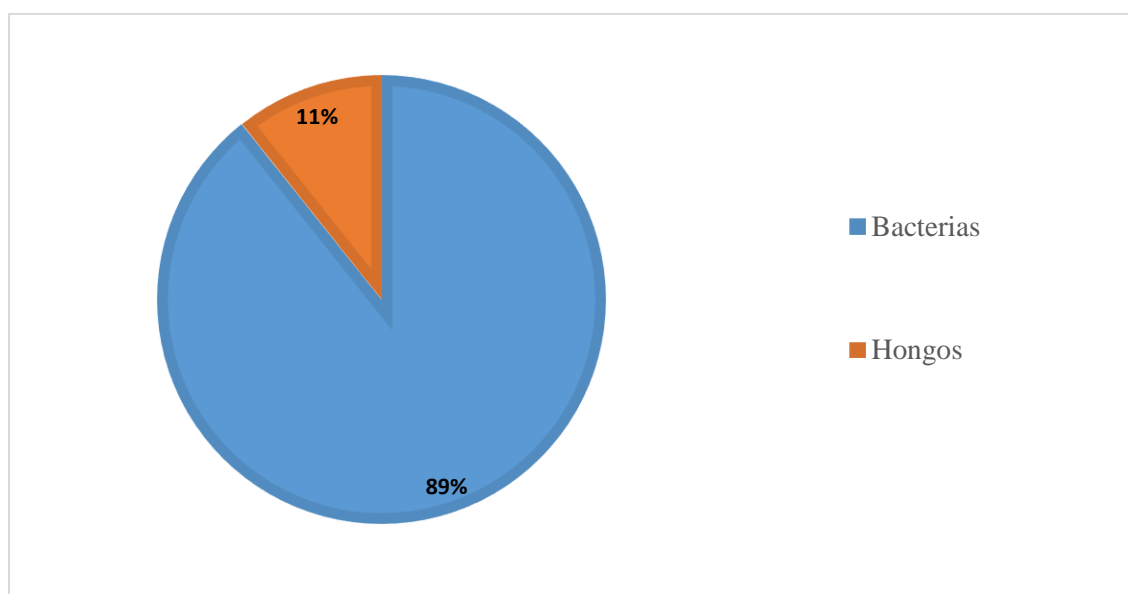
Porcentaje de reportes de larvas de insectos degradadores de poliestireno con y sin suplemento en América, Asia y Europa, 2015-2021.



Nota. Elaboración propia

Figura 14

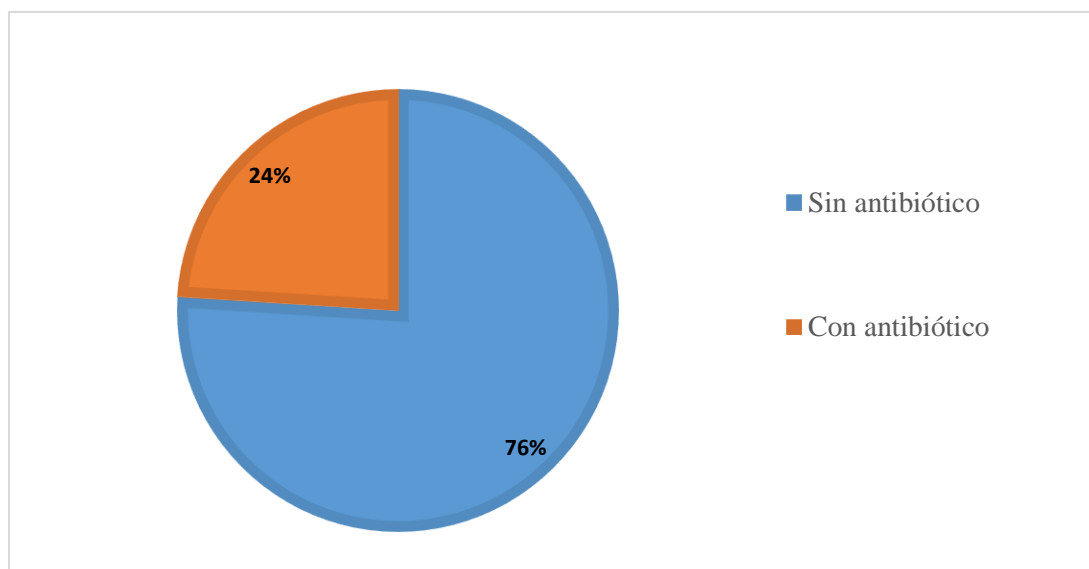
Porcentaje de reportes de microorganismos en el contenido intestinal y heces de insectos degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021.



Nota. Elaboración propia

Figura 15

Porcentaje de reportes del uso de antibióticos para verificar la actividad degradadora del poliestireno en larvas de insectos en América, Asia y Europa, 2015-2021.



Nota. Elaboración propia

Tabla 16

Frecuencia de uso de las técnicas para la detección de la degradación de poliestireno en Asia, 2015-2021

Técnica	Reportes	
	Nº	%
Microscopía electrónica de barrido (SEM)	14	82
Espectrofotometría de dispersión de energía de rayos X(EDS)	2	12
Microscopía de fluorescencia	1	6

Nota. Elaboración propia

Tabla 17

Frecuencia de uso de las técnicas para la cuantificación de la degradación de poliestireno en Asia, 2015-2021

Técnica	Reportes	
	Nº	%
Termogravimetría (TGA)	8	25
Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	8	25
Cromatografía por permeación en gel (GPC)	6	19
Cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-TO)	5	16
Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS)	3	9
Resonancia magnética nuclear (RMN)	2	6

Nota. Elaboración propia

Tabla 18

Frecuencia de uso de las técnicas para la detección de la degradación de poliestireno en América y Europa, 2015 -2021

Técnicas de detección					
Reportes de América			Reportes de Europa		
	Nº	%		Nº	%
Microscopía electrónica de barrido (SEM)	1	100	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	3	75
			Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	1	25

Nota. Elaboración propia

Tabla 19

Frecuencia de uso de las técnicas de cuantificación de la degradación de poliestireno en América y Europa, 2015 -2021

Técnicas de cuantificación				
Reportes de América			Reportes de Europa	
	Nº	%		
Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	3	50		
Termogravimetría (TGA)	2	33	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	100
Cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-TO)	1	17		

Nota. Elaboración propia

4.6 Eficiencia de la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados en América, Asia y Europa, 2015-2021

En las publicaciones sobre insectos y microorganismos asociados degradadores de poliestireno identificados en América, Asia y Europa, 2015-2021 se determinó la eficiencia en la degradación mediante la tasa de consumo del polímero por día ($\text{mg larva}^{-1} \text{ día}^{-1}$) y tasa de supervivencia de las larvas.

La eficiencia en la degradación del PS estimada con la tasa de consumo fue de $0,003\text{-}34,27 \text{ mg larva}^{-1}\text{día}^{-1}$, con una tasa de supervivencia de $23,60\text{-}99,90 \%$ y una tasa de degradación del PS por los microorganismos asociados a los insectos de $7,4 \pm 0,4 - 12,97 \pm 1,05 \%$ (Tablas 20, 21). La tasa de consumo del PS estimada en América fue $0,031\text{-}0,210 \text{ mg larva}^{-1} \text{ día}^{-1}$; en Asia de $0,003\text{-}34,27 \text{ mg larva}^{-1}\text{día}^{-1}$ y en Europa $0,022\text{-}4,000 \text{ mg larva}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

Tabla 20

Eficiencia de la degradación del poliestireno por insectos y microorganismos reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

Continente	Autor	Insecto	Tiempo (días)	Tasa de consumo (mg larva ⁻¹ día ⁻¹)	Tasa de supervivencia (%)
América	Peña et al. (2020)	<i>T. molitor</i>	120	0,031	20,0
	Palmer et al. (2021)	<i>T. molitor</i>	21	0,210
Asia	Yang et al. (2018b)	<i>T. molitor</i>	32	0,170	80,0
	Yang et al. (2018a)	<i>T. molitor</i>	32	0,220	86,70
	Yang et al. (2018a)	<i>T. molitor</i>	32	0,16
	Peng et al. (2019)	<i>T. molitor</i>	31	24,30	89,3± 2,70
	Jiang et al. (2021b)	<i>T. molitor</i>	30	0,190	75,5± 7,40
	Lou et al. (2021)	<i>T. molitor</i>	29	0,003	81,3±2,50
	Rae et al. (2020)	<i>T. molitor</i>	21	0,110	90,0± 10,0
	Yang et al. (2015a)	<i>T. molitor</i>	30	0,120
	Peng et al. (2020)	<i>Z. atratus</i>	33	1,500
	Jiang et al. (2021b)	<i>Z. atratus</i>	30	7,950	90,50± 0,50
	Yang et al. (2020)	<i>Z. atratus</i>	28	0,580
	Rae et al. (2020)	<i>Z. atratus</i>	21	0,680	90,0± 10,0
	Jiang et al. (2021b)	<i>G. mellonella</i> L	30	3,080	27,00± 2,650
	Lou et al. (2020)	<i>G. mellonella</i> L.	21	0,280	23,60
	Woo et al. (2020)	<i>P. davidis</i>	14	34,27	99,90
	Peng et al. (2019)	<i>T. obscurus</i>	31	32,44	91,50± 1,50
	Kundungal et al. (2021)	<i>Uloma</i> sp.	28	0,370	78,31 ± 40
Europa	Cucini et al. (2020)	<i>A. diaperinus</i>	30	4,000	89,0
	Tsochatzis et al. (2021b)	<i>T. molitor</i>	15	0,022

Nota. Elaboración propia

Tabla 21

Eficiencia de la degradación del poliestireno por microorganismos asociados a insectos reportados en Asia, 2015-2021

Continente		Microorganismo	Tiempo (días)	Tasa de degradacion del PS (%)
Asia	Jiang et al. (2021a)	<i>Massilia</i> sp.	30	12,97 ± 1,05
	Wang et al. (2020b)	<i>Acinetobacter</i> sp.	60	12,14± 1,4
	Yang et al. (2015b)	<i>Exiguobacterium</i> sp.	60	7,4± 0,4

Nota. Elaboración propia

V. DISCUSIÓN

5.1. Características taxonómicas y morfológicas de los insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021

Las larvas de algunos coleópteros y lepidópteros mastican, ingieren y degradan en conjunto con la microbiota intestinal los polímeros sintéticos como el poliestireno, polietileno, cloruro de polivinilo y polipropileno, por lo que se les denomina “plastívoros” (Sánchez et al., 2021). Los coleópteros fueron los insectos más estudiados en su capacidad para degradar el PS como lo demostraron Peña et al. (2020) con *T. molitor*; Peng et al. (2019) con *T. obscurus*; Cuccini et al. (2020) con *Alphitobius diaperinus*; Medeiros et al. (2018) con *Zophobas morio*; Jiang et al. (2021) con *Z. atratus*; Wang et al. (2020b) con *Tribolium castaneum*; Kundungal et al. (2021) con *Uloma* sp. y Woo et al. (2020) con *Plesiophthalmus davidis*. También se han reportado larvas del lepidóptero *Galleria mellonella* como degradadores de PS (Lou et al., 2020).

El orden Coleoptera agrupa insectos conocidos como escarabajos caracterizados por la modificación de las alas anteriores (élitros) para constituir cubiertas de protección de las alas posteriores. Los coleópteros tienen una diversidad de hábitos alimenticios y el aparato bucal en su mayoría es de tipo masticador (Tapias, 2020). Las larvas de algunas especies de coleópteros son capaces de destruir los plásticos gracias a sus piezas bucales que les permiten masticar y a la actividad metabólica de su microbiota intestinal (Cuccini et al., 2020). Los adultos también pueden consumir el polímero; no obstante, son superados en forma significativa por las larvas. Al respecto, Palmer et al. (2021) determinaron que después de 20 días, la tasa de consumo del PS por las larvas de *T. molitor* fue de 0,21 mg día⁻¹ en comparación con 0,01 mg día⁻¹ en los adultos y 0,24 mg día⁻¹ en las larvas junto a los adultos. Los valores registrados evidenciaron que la presencia de los adultos incrementó la tasa de consumo del polímero por las larvas que superaron significativamente a los adultos. Por su parte, Gallego (2020) determinaron que cada hora las larvas consumen un rango de 4-6 % del peso de su

cuerpo, por cuanto éstas deben prepararse nutricionalmente para la metamorfosis durante la fase de pupa.

T. molitor es el coleóptero más estudiado como degradador de PS. Es una especie detrívora, condición que facilita la supervivencia de los estadios inmaduros con el consumo de diversos sustratos orgánicos (Gallego, 2020). Las larvas presentan aparato bucal masticador con mandíbulas muy esclerotizadas que le permiten perforar, fragmentar e interiorizar el PS (Kundungal et al., 2021; Woo et al., 2020). Las larvas del lepidóptero *G. mellonella* presentan el cuerpo esclerotizado y en la cabeza tienen dientes apicales muy desarrollados pero carecen del diente sub-apical. Se hipotetiza que los dientes apicales confieren una adaptación ventajosa para la alimentación agresiva de las larvas, que es más intensa en los estadios tempranos que en los finales. Se considera la plaga más importante en la crianza de abejas por la alimentación destructiva de las larvas que forman túneles y agujeros en el sustrato alimento (Kwadha et al., 2017).

5.2. Características taxonómicas y morfológicas de los microorganismos asociados a los insectos reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021

Los microorganismos del intestino de las larvas reportadas como degradadores de PS correspondieron a bacterias y hongos, con predominancia de las bacterias, resultado que coincide con el reporte de Cuccini et al. (2020) en larvas de *A. diaperinus* y Jiang et al. (2021) en larvas de *T. molitor*, *Z. atratus* y *G. mellonella*.

Los Phylum Firmicutes, Bacteroidetes, Proteobacteria, Actinobacteria y Tenericutes agruparon a las bacterias asociadas a las larvas de insectos reportadas como degradadoras de PS. A excepción del Phylum Tenericutes se coincide con el reporte de Cuccini et al. (2020), quienes demostraron que en la diversidad microbiana del intestino de las larvas de *A. diaperinus* alimentadas con PS predominaron los Phylum Proteobacteria (76 %), Firmicutes (13 %), Actinobacteria (4 %), Bacteroidete (3 %) y Fusobacteria (3 %), así como también las clases Gammaproteobacteria (76 %), Bacilli (13 %), Actinobacteria (4 %), Bacteroidia (3 %) y Fusobacteria (3 %). La predominancia de los Phylum Firmicutes y Proteobacteria en los microorganismos intestinales de las larvas de insectos degradadores de PS también fue reportada en *G. mellonella* por Lou et al. (2020), en *T. molitor*, *Z. atratus* y *G. mellonella* por Jiang et al. (2021a) y los

Phylum Firmicutes, Proteobacteria y Tenericutes en *T. molitor* por Lou et al. (2021).

En el intestino de larvas de *T. molitor* alimentadas con PS predominaron los Phylum Proteobacteria (68,68 %) y Firmicutes (30,97 %), las clases Gammaproteobacteria, Bacilli, Clostridia, Acidobacteria, Actinobacteria, Alphaproteobacteria y Flavobacteria y las especies *Enterobacter hormaechei*, *Lactococcus garvieae*, *Enterobacter aerogenes*, *Klebsiella oxytoca*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Serratia marcescens*, *Enterococcus lactis* y *L. lactis*. Entre estas especies solo en *K. oxytoca*, *P. aeruginosa* y *S. marcescens* se demostró la utilización del PS como fuente de carbono, resultado que evidenció que no todos microorganismos asociados al intestino son capaces de degradar el PS (Urbanek et al., 2020).

El análisis de la comunidad microbiana del intestino de las larvas de *P. davidis* demostró que el 99 % de secuencias bacterianas estuvieron presentes en las larvas alimentadas con PS y en el testigo. En todas las larvas se identificaron los géneros *Lactococcus*, *Aquabacterium*, *Buttiauxella*, *Raoultella* y *Serratia* y en las larvas alimentadas con PS el género adicional de *Enterococcus*. Los géneros *Serratia* y *Lactococcus* se incrementaron 6 y 10 veces respectivamente cuando las larvas se alimentaron con el polímero y *Serratia* spp. correspondió al 33 % de los microorganismos intestinales (Woo et al., 2020). Por su parte, Jiang et al. (2021a) demostraron que la alimentación de las larvas con PS enriqueció los microorganismos intestinales, con predominancia de *Enterococcus*, Enterobacteriaceae, *Kluyvera* y *Lactococcus* en *Z. atratus*; *Enterococcus*, Enterobacteriaceae, *Escherichia*, *Shigella* y *Lactococcus* en *T. molitor* y *Enterococcus*, Enterobacteriaceae, *Serratia* y *Enterobacter* en *G. mellonella*. Las Enterobacteriaceae y *Enterococcus* spp. se encontraron en las tres especies de larvas alimentadas con PS durante 20 días, lo que indicaría un rol importante en la degradación del plástico. Las bacterias de las familias Pseudomonadaceae, Micrococcaceae, Bacillaceae y Enterobacteriaceae, así como los géneros *Kocuria* (Gram positivas), *Pseudomonas*, *Cronobacter*, *Serratia* y *Klebsiella* (Gram negativas) fueron identificadas con mayor frecuencia en el intestino de las larvas alimentadas con PS en comparación con el testigo (Woo et al., 2020; Rae et al., 2020). Asimismo, especies de *Pseudomonas* se encontraron en el 100 % de las muestras intestinales analizadas y los géneros *Kocuria* y *Pseudogracilibacillus* en

el 75,8 -80,0 % de muestras, respectivamente (Brandon et al., 2021; Cuccini et al., 2020). Por su parte, Brandon et al. (2021) determinaron que las especies prevalentes en el contenido intestinal de larvas de *T. molitor* degradadoras de PS fueron *S. marcescens*, *K. aerogenes* y *P. aeruginosa*.

Los Ascomycota y Basidiomycota (División-Phylum) agruparon a los hongos asociados a las larvas de insectos reportados como degradadores de PS. Se coincide con Cuccini et al. (2020) quienes reportaron como predominantes hongos de las clases Sordariomycetes, Agaricomycetes y Eurotiomycetes con los géneros *Trichoderma*, *Hypodermella* y *Aspergillus*, respectivamente. Los investigadores concluyeron que los Ascomycota estuvieron presentes en el 70 % de las larvas alimentadas con PS y en el 85 % de las larvas testigo, en comparación con los Basidiomycota identificados en el 29 % de las muestras intestinales.

Las bacterias y hongos reportados como degradadores de PS presentan diversa capacidad metabólica por lo que también son considerados agentes de control biológico (*B. thuringiensis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Trichoderma* spp.), productores de acidez en los productos lácteos (*Lactococcus* spp.), causantes de deterioro de alimentos (*Clostridium* sp., *Flavobacterium* sp.), promotores de crecimiento en plantas (*B. megaterium*, *B. aryabhattai*, *Pantoea agglomerans*, *Klebsiella* spp., *Serratia* spp., *Enterobacter* spp., *Citrobacter* spp., *Trichoderma* spp.), fitopatógenos (*Erwinia* spp.) y patógenos para los seres vivos (*Acinetobacter* spp., *Pseudomonas* spp., *B. anthracis*, *Shigella* spp., *Aspergillus* spp.) como lo reportaron Shah et al. (2003), Woo et al. (2020), Yang et al. (2021), Przemieniecki et al. (2020) y Cassone et al. (2020).

5.3. Mecanismo de degradación del PS por los insectos y microorganismos reportados como degradadores en América, Asia y Europa, 2015-2021

El consumo y la degradación del PS como único sustrato por los insectos ha sido demostrada por Kundungal et al. (2021), Woo et al. (2020) y Yang et al. (2019), así como también se ha determinado que el PS no afectó en forma negativa el crecimiento y desarrollo del insecto (Kundungal et al., 2021; Nukmal et al., 2018; Yang et al., 2018) y que si lo afectó en forma negativa (Yang et al., 2015). Según Lou et al. (2021) los plásticos como única fuente de consumo no tienen suficientes nutrientes para el crecimiento y metamorfosis de los insectos por lo que se requiere alimento extra para establecer y mantener la degradación del PS por las larvas de

los insectos. Por lo contrario, Lou et al. (2020) concluyeron que el suplemento de PS en la dieta de las larvas incrementa la tasa de sobrevivencia, pero disminuye el consumo de plástico.

Respecto a las evidencias que sustentan la degradación del PS, se ha demostrado el consumo del polímero en un periodo de 24 horas de retención del PS en el intestino, se observó despolimerización y ruptura de la estructura de las cadenas largas, con aparición de fragmentos y disminución del peso molecular y se determinó que en 16 días el 47 % del carbono del polímero fue convertido en dióxido de carbono y el 4 % fue eliminado en las heces (Yang et al., 2015). Al respecto, Kundungal et al. (2021) observaron que las larvas de *Uloma* sp. al estar en contacto con el PS inmediatamente empezaron a comerlo y lo perforaron después de 2 horas con una tasa de consumo de 0,37 mg/día.

Jiang et al. (2021b) concluyeron que entre los insectos degradadores del PS, el coleóptero *Z. atratus* presentó la mayor capacidad de consumo y la mayor tasa de sobrevivencia en un experimento de 30 días. Las larvas de *Z. atratus* degradaron el PS hasta moléculas de bajo peso molecular y las larvas de *T. molitor* despolimerizaron el polímero por destrucción del anillo bencénico. Al respecto, se ha calculado una tasa de consumo de PS de 0,12 mg día⁻¹ para *T. molitor* y 0,58 mg día⁻¹ con *Z. atratus* (Yang et al., 2015a; Yang et al., 2020). La degradación del PS suplementado en sustratos de fácil biodegradabilidad por coleópteros y lepidópteros ha sido demostrada por Tsochatzis et al. (2021a), Yang et al. (2018b) y Gao et al. (2010), quienes utilizaron cebada, salvado de trigo y salvado, respectivamente en mezcla con el polímero como alimento de las larvas investigadas.

En cuanto a las evidencias que demuestran que el consumo de PS no afecta el desarrollo de las larvas, Yang et al. (2015) demostraron disminución de hasta el 31 % de la masa del polímero durante 30 días de alimentación de *T. molitor* y también observaron la sobrevivencia de las larvas alimentadas de PS como único alimento hasta la emergencia de los escarabajos adultos. Kundungal et al. (2021) demostraron que las larvas de *Uloma* sp. alimentadas con PS completaron su crecimiento y los estadios de desarrollo (larva, pupa, adulto). Las hembras ovopositaron y las larvas eclosionaron en 1 semana. El tiempo requerido para completar el estadio fue de 38,6 días (larvas), 8,4 días (pupa) y 124 días (adulto) con el PS como alimento y 16,4 días (larvas), pero no llegaron a pupas ni adultos en el testigo sin alimento.

Yang et al. (2018a) demostraron que larvas de *T. molitor* alimentadas con PS presentaron una tasa de sobrevivencia de 86,7 % durante 32 días, sin diferencias significativas con 90 % (afrecho) pero sin con 54 % del testigo no alimentado. Woo et al. (2020) determinaron que las larvas de *P. davidis* consumieron el PS (34,27 mg larva⁻¹) durante 14 días sin presentar mortalidad en comparación con 11 % en el testigo. Nukmal et al. (2018) demostraron que dietas de EPS y XPS no afectaron en forma significativa la mortalidad de larvas de *T. molitor*, pero si disminuyeron en forma significativa el número de larvas y aumentaron el tiempo para el empupado.

Respecto a las evidencias que demuestran que el consumo del PS afecta el desarrollo de las larvas, Yang et al. (2018a) demostraron que las larvas de *T. molitor* alimentadas con PS alcanzaron una tasa de sobrevivencia de 86,7 % y mantuvieron el peso constante, en comparación con las larvas que consumieron salvado, en las que la tasa fue de 90% y ganaron 32% en peso. El PS como sustrato único es degradado en forma parcial por los insectos y se requiere la actividad metabólica adicional como la microbiota intestinal para la mineralización del polímero hasta dióxido de carbono. Esta es una aseveración sustentada por Peña et al. (2020) en América; Peng et al. (2020) en Asia y Billen et al. (2020) en Europa.

Billen et al. (2020) observaron que cuando las larvas de *T. molitor* y *G. mellonella* fueron alimentadas solo con PS, la tasa de sobrevivencia fue muy baja y éstos no fueron capaces de crecer en su normalidad. Por su parte, Leluk et al. (2017) determinaron disminución del contenido de proteínas y azúcares en las larvas alimentadas con PS. A su vez, Matyja et al. (2020) concluyeron que las alteraciones en el desarrollo de las larvas alimentadas con PS son consecuencia de una disminución de las reservas y una reacción del organismo larval a la alimentación insuficiente. Según estas investigaciones la incapacidad o dificultad para completar el ciclo de vida por las larvas de *T. molitor* alimentadas solo con PS evidencia el requerimiento de mayor investigación antes de proponer el uso de estos insectos como degradadores de PS a nivel comercial.

El consumo de PS con o sin suplemento se verificó en las características de las larvas y del polímero. En las larvas se determinó incremento del peso (Rae et al., 2020), tasa de sobrevivencia y tasa de consumo del polímero (Yang et al., 2018), número y tiempo de desarrollo de larvas, pupas y prepupas (Nuk mal et al., 2018). El consumo del PS por las larvas de los insectos reportados como degradadores se

determinó por los cambios en la morfología como presencia de agujeros (Billen et al., 2020), pérdida de peso (Cucini et al., 2020), porcentajes del polímero no digerido (Yang et al., 2018) y despolimerización del polímero (Kundungal et al., 2021) y disminución del área de la película de PS (Wang et al., 2020). La formación de enlaces C=O y C-O y las cadenas largas de los ácidos grasos son evidencia de la despolimerización y biodegradación del PS (Lou et al., 2020).

La presencia de bacterias en el contenido intestinal de las larvas de los insectos reportados como degradadores de PS fue demostrado por Leluk et al. (2017) en *T. molitor*; Cucini et al. (2020) en *A. diaperinus*; Woo et al. (2020) en *P. davidis*, Jiang et al. (2021) en *Z. atratus* y Lou et al. (2020) en *G. melonella*. Por su parte, Cucini et al. (2020) además de las bacterias reportaron hongos filamentosos de los géneros *Aspergillus*, *Hyphodermella* y *Trichoderma* en el intestino de *A. diaperinus*. Urbanek et al. (2020) analizaron el contenido intestinal de larvas de *T. molitor* y encontraron predominancia de las clases Gammaproteobacteria, Bacilli, Clostridia, Acidobacteria, Actinobacteria, Alphaproteobacteria y Flavobacteria. Estas investigaciones demostraron actividad degradadora de PS en los géneros de bacterias *Klebsiella*, *Pseudomonas* y *Serratia*. De igual forma Min et al. (2020) estudiaron una cepa de *Pseudomonas aeruginosa* previamente aislada del supergusano *Z. atratus* y demostraron que esta bacteria es capaz de degradar el PS además del polietileno, polipropileno y los utilizó como fuente de energía y compuestos celulares para su crecimiento.

La actividad enzimática y bioquímica en el intestino de las larvas evidencia la degradación del poliestireno. En este contexto, se han encontrado moléculas bioactivas como los ácidos grasos mirístico, palmítico y oleico, ácido undecanoico y amidas a partir de sus respectivos ácidos grasos (Tsochatzis et al., 2020), hidrocarburos con largas cadenas y oligómeros de PS como dímeros y trímeros (Tsochatzis et al., 2021). Asimismo, se ha observado incremento en el dióxido de carbono como indicativo del porcentaje de plástico consumido (Huang et al., 2021).

La adición del antibiótico al alimento suplementado a los insectos afectó en su forma negativa la degradación del PS, evidenciando que las bacterias intestinales fueron inhibidas, por lo que se observó disminución del peso de las larvas que no pudieron metabolizar el PS (Yang et al., 2020). Asimismo, no se observó despolimerización del polímero, pero si oxidación y pérdida de peso (Kundungal et al., 2021; Lio et al., 2021; Lou et al., 2020). El PS es ingerido (Billen et al., 2020)

y masticado en pequeños fragmentos antes de pasar el intestino de las larvas (Yang et al., 2015a) donde la degradación del PS se atribuye a la interacción de las enzimas oxigenasas de las larvas (Li et al., 2010) y la microbiota intestinal (Jiang et al., 2021; Lu et al., 2020; Yang et al., 2015b). Las bacterias intestinales tienen la capacidad para metabolizar el PS como fuente de carbono y energía mineralizándolo hasta dióxido de carbono (Huang et al., 2021).

5.4. Técnicas utilizadas para la detección y cuantificación de la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados

La detección y cuantificación de la degradación del PS por los insectos y microorganismos asociados se realiza en forma directa en el polímero y en forma indirecta en las larvas. En el PS se determina el peso perdido (Palmer et al., 2022; Matyja et al., 2020) y el peso del polímero consumido (Cuccini et al., 2020); no obstante ambos expresan lo mismo es decir la disminución del peso del polímero debido al consumo por las larvas o por los microorganismos asociados. En las larvas se investiga el peso (Leluk et al., 2017), la sobrevivencia, el tiempo requerido para el empupado (Matyja et al., 2020), la tasa de consumo del polímero (Palmer et al., 2022), los componentes del extracto de la biomasa de las larvas, monómeros, oligómeros y aditivos del PS, así como también moléculas bioactivas componentes del tracto intestinal y excretas de las larvas (Tsochatzis et al., 2021a).

La microscopía electrónica de barrido (SEM) fue la técnica más utilizada para la verificar detección de la degradación del PS por los insectos y microorganismos asociados y en menor grado la espectrofotometría de dispersión de rayos X (EDS), microscopía de fluorescencia y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Con la técnica SEM se demostró la presencia de agujeros, túneles, grietas, rugosidades debido al consumo del polímero (Peña et al., 2020) y ausencia de fragmentos del PS en las excretas que verifica la degradación a nivel del intestino de las larvas (Vera et al., 2021). También se verificó la colonización y degradación del PS por *P. aeruginosa*. Se observaron las colonias firmemente adheridas a la superficie del PS y después de 60 días, al remover la biopelícula se observaron cambios en el aspecto, así como también agujeros donde habían estado las colonias bacterianas, evidencia que demostró la degradación del polímero por las bacterias (Rae et al., 2020). Asimismo, se observó la adherencia y formación de biopelícula

en la superficie del PS por *Acinetobacter* sp. y la presencia de cavidades y agujeros a los 30 días del cultivo bacteriano (Wang et al., 2020).

La termogravimetría (TGA) y la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) fueron las técnicas más utilizadas para la cuantificación de la degradación del PS por los insectos y microorganismos asociados y en menor grado se utilizaron la cromatografía por permeación en gel (GPC), espectroscopía de fotoelectrones de rayos x (XPS), cromatografía de gases/ Espectrometría de masas (CG-TO) y Resonancia magnética nuclear (RMN)

La técnica de gravimetría aplicada en el peso del polímero consumido es la más utilizada por cuanto es accesible para los investigadores y determina en forma directa el porcentaje del PS consumido por las larvas o por los microorganismos asociados (Urbanek et al., 2021; Palmer et al. 2022; Peng et al., 2020), así como también el peso de las larvas con y sin consumo del PS (Matyja et al., 2020) y el peso de las excretas de las larvas (Vera et al., 2021). El análisis termogravimétrico (TGA) detecta las modificaciones térmicas del PS. Con esta técnica se registraron pérdidas de masa de 56,78 % a 350-470 °C en el polímero residual de las excretas de las larvas alimentadas con PS y 98,45 % en el testigo, diferencias que evidenciaron el cambio de la composición del PS después del paso a través del intestino de las larvas (Kundungal et al., 2021).

Los análisis FTIR caracteriza la despolimerización del PS de alto peso molecular, oxidación de las cadenas largas de hidrocarburos y destrucción del anillo bencénico. Asimismo, confirman la modificación del polímero por la degradación e incorporación del oxígeno al diferenciar nuevos picos asociados a los grupos carbonilos ($\text{H}_2\text{C}=\text{O}$), hidroxilos ($-\text{OH}$) y demuestran la disminución de los anillos bencénicos: $\text{C}=\text{C}$ (Kundungal et al., 2021; Yang et al., 2018). La cromatografía por permeación en gel (GPC) demuestra los cambios en el peso molecular (M_w y M_n) y en la distribución del peso molecular del PS debido a la despolimerización. Se ha reportado que el M_n disminuye de 95 800 a 77 000 ($p=0,0214$) y el M_w de 239 000 a 212 000 ($p=0,0206$) en un período de 24 días (Yang et al., 2018b; Yang et al., 2015a).

5.5. Comparación de la eficiencia en la degradación del poliestireno por los insectos y microorganismos asociados reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

La eficiencia de la degradación del PS por los insectos y microorganismos asociados reportados como degradadores de PS en América, Asia y Europa, 2015-2021 fue estimada como tasa de consumo en las larvas de los insectos de 0,003-34,27 mg larva⁻¹día⁻¹, rango muy superior al calculado por Kundungal et al. (2021) con una tasa de consumo de PS de 0,12 mg día⁻¹ por *T. molitor* y 0,58 mg día⁻¹ por *Z. atratus* (Kundungal et al, 2021). La tasa de biodegradación del PS varía según el tiempo y temperatura (Yang et al., 2018b), las características del lecho de crianza y el pretratamiento o suplementación del PS (Palmer et al., 2021), contenido de agua en la dieta alimenticia que incluye el PS (Tsochatzis et al., 2021a) y las características físicas del polímero (Leluk et al., 2017).

El término biodegradación de los plásticos se refiere a la actividad biológica en la degradación de polímeros plásticos hasta la mineralización a dióxido de carbono y agua. Estos polímeros son demasiado grandes para pasar a través de las membranas celulares por lo que durante el proceso degradativo los polímeros primero son convertidos en fragmentos pequeños que luego son metabolizados por la microbiota intestinal (Yang et al., 2018a). Después que el PS es ingerido por las larvas no solo los microorganismos intestinales juegan un rol importante en la degradación del polímero sino también las enzimas de las larvas que desempeñan un rol crucial en el proceso degradativo. Las larvas de los insectos y los microorganismos intestinales tienen una interacción simbiótica beneficiosa para ambos, conocimiento que debe ser aprovechado para las tecnologías de biorremediación en ambientes contaminados con PS (Jiang et al., 2021a).

VI. CONCLUSIONES

7.1 Se identificaron 110 artículos científicos en las bases de datos Scopus, 85 en Web of Science (WOS) y 15 en American Chemical Society (ACS) entre los que 21 se descargaron a texto completo, se incluyeron 17 artículos y se revisaron 38 artículos sobre la degradación del PS por insectos y microorganismos asociados publicados del 2015-2021.

7.2 Los insectos del Orden Coleóptero se reportaron como degradadores de PS 89 % y los insectos del Orden Lepidóptera en el 11 % de los artículos científicos publicados en América, Asia y Europa durante 2015-2021. Los Coleópteros de la familia Tenebrionidae reportados como degradadores de PS fueron *Tenebrio molitor*, *T. obscurus*, *Tribolium castaneum*, *Plesiophthalmus davidis*, *Zophobas morio*, *Zophobas atratus*, *Uloma* sp. y *Alphitobius diaperinus*. A su vez, el Lepidóptero de la familia Pyralidae fue *Galleria mellonella*.

7.3 Las bacterias se reportaron como predominantes (89 %) en las publicaciones sobre microorganismos asociados a los insectos degradadores de PS, en comparación con los hongos (11 %). Entre las bacterias predominaron (68 %) las Gram negativas y en cuanto a la morfología bacteriana los bacilos (78 %).

7.4 En el 60 % de los artículos se reportó que las larvas de los insectos son capaces de degradar el PS al utilizarlo como única fuente de nutriente; no obstante, en el 40 % de los artículos se reportó que las larvas no son capaces de degradar el PS y debe ser suplementado con otros sustratos orgánicos. Asimismo, el 96 % de las investigaciones reportaron la presencia de microorganismos en el intestino y excretas de las larvas, que desempeñan un rol muy importante en la degradación del polímero.

7.5 Las técnicas más usadas para la detección de la degradación del PS fueron la Microscopía electrónica de barrido (SEM) y la espectrofotometría de dispersión de rayos X (EDS) y para la cuantificación fueron la Termogravimetría (TGA) y la Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

7.6 La eficiencia de los insectos y microorganismos asociados reportados como degradadores de poliestireno en América, Asia y Europa, 2015-2021 estimada como tasa de consumo en las larvas de los insectos fue de 0,003-34,27 mg larva⁻¹día⁻¹,

con una tasa de supervivencia de 23,60-99,90 % y una tasa de degradación del PS por los microorganismos asociados a los insectos de $7,4 \pm 0,4$ - $12,97 \pm 1,05$ % .La tasa de consumo estimada en América fue 0,031-0,210 mg larva⁻¹ día⁻¹; en Asia de 0,003-34,27 mg larva⁻¹día⁻¹ y en Europa 0,022-4,000 mg larva⁻¹ día⁻¹.

VII. RECOMENDACIONES

Desarrollar investigaciones experimentales sobre la capacidad de degradación de los microorganismos asociados a insectos

Investigar nuevos insectos propios de la región con la capacidad degradativa del poliestireno y otros plásticos.

Realizar investigaciones para comprender el mecanismo de degradación de PS y el papel de los microorganismos intestinales dentro de las larvas de los insectos.

VIII. REFERENCIAS

- Aalbu, L., Triplehorn, A., Campbell, M., Brown, W., Somerby, E., y Thomas, B. (2002).
Family 106. Tenebrionidae. Arnett, J., y M. C. Thomas (Eds.). American beetles:
Polyphaga: Scarabeoidea through Curculionoidea. (pp. 463- 509. Vol. 2.). CRC Press.
Boca Raton
- Alessandri, G., Van, D., y Ventura, M. (2021). The genus *Bifidobacterium*: from genomics to
functionality of an important component of the mammalian gut microbiota.
Computational and Structural Biotechnology Journal, 19, 1472-1487.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.csbj.2021.03.006>
- Ando, K., Itioka, T., y kishimotoyamada, K. (2017). Registro de phototactic Tenebrionidae
(Coleoptera) de Lambir Hills, Borneo, con descripción de un nuevo género y doce
nuevas especies. *Contributions From The Biological Laboratory Kyoto University*,
30(3), 127-171. <http://hdl.handle.net/2433/218205>
- Aremu, B., y Babalola, O. (2015). Classification and taxonomy of vegetable macergens.
Frontiers in Microbiology, 6(1361), 1-11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01361>
- Austin, B. (2014). La Familia *Alcaligenaceae*. In: Rosenberg, E., DeLong, E.F, Lory, S.,
Stackebrandt, E., Thompson, F. (Eds) The Prokaryotes. Springer, Berlín, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-30197-1_397

- Badylak, S., Philips, E., Batich, C., Jackson, M., y Wachnicka, A. (2021). Polystyrene microplastic contamination versus microplankton abundances in two lagoons of the florida keys. *Scientific Reports*, 11, (6029), 1-10.
<https://www.nature.com/articles/s41598-021-85388-y.pdf?origin=ppub>
- Bae, J., Cho, H., Jung, H., Park, J., Yun, S., Ha, S., Lee, Y., y Kim, T. (2021). Changes in intestinal microbiota due to the expanded polystyrene diet of mealworms (*Tenebrio molitor*). *Indian Journal of Microbiology*, 61(2), 130–136.
<https://doi.org/10.1007/s12088-021-00922-w>
- Baldani, J., Rouws, L., Magalha, L., Cruz, E., Lopes, F., Schmid, M., y Hartmann, A. (2014). *The Prokaryotes - Alphaproteobacteria and Betaproteobacteria*. DOI 10.1007/ 978-3-642-30197-1_291
- Begum, S., Rane, A., y Kanny., K. (2020). Applications of compatibilized polymer blends in automobile industry. Ajitha, A., y Sabu, T (Eds.). *Compatibilización de mezclas de polímeros morfologías de fase a micro y nanoescala, caracterización y propiedades de interfase* (pp. 563-593). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816006-0.00020-7>
- Bennett, J. (2016). An Overview of the genus *Aspergillus*. *Biology*.
<https://www.caister.com/openaccess/pdf/aspergillus1.pdf>
- Billen, P., Khalifa, L., Gerven, F., Tavernier, S., y Spatari, S. (2020). Technological application potential of polyethylene and polystyrene biodegradation by macro-organisms such as mealworms and wax moth larvae. *Science of The Total Environment*, 735, (139521), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139521>
- Bin, J., Ho, W., Hyun, S., Jung, K., Soo, Y., Lee, S., y Jung, N. (2014). Developmental characteristics of *Tenebrio molitor* larvae (Coleoptera: Tenebrionidae) in different

instars. *International Journal of Industrial Entomology*, 28(1), 5-9.

<http://dx.doi.org/10.7852/ijie.2014.28.1.5>

Brandon, A., Garcia, A., Khlystov, N., Wu, W., y Criddle, C. (2021). Enhanced bioavailability and microbial biodegradation of polystyrene in an enrichment derived from the gut microbiome of *Tenebrio molitor* (mealworm larvae). *Environmental Science & Technology*, 55(3), 2027-2036. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04952>

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>

Calmont, B. (2008). *Galería del mundo de los insectos*. https://www.galerie-insecte.org/galerie/Tenebrio_obscurus.html

Cao, D., Wang, X., Luo, X., Liu, G., y Zheng, H. (2017). Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil. *Earth and Environmental Science*, 23(012148), 1-4. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/61/1/012148/pdf>

Carroll, C., Morse, S., Miller, S., y Mietzner, T. (2016). *Microbiología Médica*. 27^a ed. <https://booksmedicos.org/microbiologia-medica-27a-edicion/>

Cassone, J., Grove, C., Elebute, O., Villanueva, S., y LeMoine, C. (2020). Role of the intestinal microbiome in low-density polyethylene degradation by caterpillar larvae of the greater wax moth, *Galleria mellonella*. *The Royal Society*, 287, 1-9.

<http://doi.org/10.1098/rspb.2020.0112>

Cavanaugh, N., Parthasarathy, A., Wong, N., Steiner, K., Chu, J., Adjei, J., y Hudson, H. (2021). *Exiguobacterium* sp. is endowed with antibiotic properties against Gram

positive and negative bacteria. *BMC Research Notes*, 14 (230), 1-7.

<https://doi.org/10.1186/s13104-021-05644-2>

Ccallo, M., Sacaca, F., Callata, R., Vigo, J., y Calla, J. (2020). Biodegradación de polímeros de plástico por *Pseudomonas*. *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 6(2), 46-59.

https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/article/view/1457/1834

Centro de Información Técnica, CIT. (2011). *Poliestireno características y ventajas respecto al medio ambiente*. <http://ecoplas.org.ar/pdf/38.pdf>

Chavez, F., Rodriguez, I., y Petranovskiic, V. (2014). Caracterización por SEM, EDS y micro-Raman de la influencia de la relación molar SiO₂/Al₂O₃ y temperatura de reducción sobre el sistema CuZSM5. *Revista Mexicana de Física* 60, 340–349.

<https://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v60n5/v60n5a2.pdf>

Cota, K., Núñez, J., Delgado, M., y Martínez, A. (2019). Biorremediación: actualidad de conceptos y aplicaciones. *Biotechnia*, 21(1), 37-44.

<http://www.colech.edu.mx/cont/descargables/biotechnia.pdf>

Cucini, C., Funari, R., Mercati, D., Nardi, F., Carapelli, A., y Marri, L. (2021). Polystyrene shaping effect on the enriched bacterial community from the plastic-eating *Alphitobius diaperinus* (Insecta: Coleoptera). *Symbiosis*, 86, 305-313.

<https://doi.org/10.1007/s13199-022-00847-y>

Cucini, C., Leo, C., Vitale, M., Frati, F., Carapelli, A., y Nardi, F. (2020). Bacterial and fungal diversity in the gut of polystyrene-fed *Alphitobius diaperinus* (Insecta: Coleoptera). *Animal Gene*, 17, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.angen.2020.200109>

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA. (2016). *Imágenes de referencia visual*, 1-431. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/VRI2017.pdf>

- Diccionario de la Lengua Española . (2016). *Detección*. Recuperado el 27 de febrero de 2024 de <https://en.thefreedictionary.com/detecci%C3%B3n>
- Dirección General de Presupuesto Público, DGPP. (2021). *Sistema de gestión presupuestal*. https://www.mef.gob.pe/contenidos/presu_publ/anexos/Clasificador_economico_gastos_RD0034_2020EF5001.pdf
- Drury, D., Jideonwo, V., Ehmke, R., y Wade, W. (2011). An unusual barrier to gene flow: perpetually immature larvae from inter-population crosses in the flour beetle, *Tribolium castaneum*. *Journal of Evolutionary Biology*, 24, 2678-2686. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2011.02394.x>
- 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>
- Elkhawaga, A., Hetta, H., Osman, N., Hosni, A., y Mokhtar, M. (2020). Emergence of *Cronobacter sakazakii* in cases of neonatal sepsis in upper Egypt: first report in north Africa. *Frontiers Microbiology*, 11, (215), 1-9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00215>
- Ellis. J., Graham, J., y Mortensen, A. (2013). Standard methods for wax moth research. *Journal of Apicultural Research*, 52(1), 1-18. <https://doi.org/10.3896/IBRA.1.52.1.10>
- Faizal, M., Izera, S., Yasin, M., Mohd, E., y Zulperi, D. (2020). The emergence of *Pantoea* species as a future threat to global rice production, *Journal of Plant Protection Research*, 60(4), 327-335. https://journals.pan.pl/Content/117055/PDF/R_01_JPPR_60_4_767_Azizi.pdf

- Fajardo, P., Maughan, H., y Nicholson, W. (2014). Evolution in the Bacillaceae. *Microbiology Spectrum*, 2(5), 1-33. <http://dx.doi.org/10.1128/microbiolspec.TBS-0020-2014>
- Farrelly, T., y Shaw, I. (2017). Polystyrene as hazardous household waste. En Mmereki, D. (Eds). *Household Hazardous Waste Management* (pp. 45-60). IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/65865>
- Fauna & Flora International's, FFI. (2020). *An initial investigation into marine uses of foamed polystyrene, breaking down ocean polystyrene*. https://cms.fauna-flora.org/wp-content/uploads/2020/07/FFI_2020_Breaking-Down-Ocean-Polystyrene_Scoping-Report.pdf
- Felis, E., y Dellaglio, F. (2015). Taxonomy of Lactobacilli and Bifdobacteria. *Current Issues Intestinal Microbiol*, 8, 44-61. <https://www.caister.com/backlist/ciim/v/v8/05.pdf>
- Flores, G. (11 de octubre de 2016). Iniciativa con proyecto de decreto por el que se reforman los artículos 7, 19, 33, 98 y 106 de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos, en materia de reciclaje de unicel. Cámara de cenadores, comisión de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, 12 de octubre de 2016, num 1092, pp. 1-24. https://www.senado.gob.mx/comisiones/medio_ambiente/docs/iniciativas/INIC102-EXP1972.pdf
- Foster, E., y Pallen, M. (2022). The microbial ecology of *Escherichia coli* in the vertebrate gut. *FEMS Microbiology Reviews*, 46(3), 1-22. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuac008>
- Gallardo, E. (2017). *Metodología de la investigación: manual autoformativo interactivo*. Universidad Continental.

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/4278/1/DO_UC_EG_MAI_UC0584_2018.pdf

Gallego, F. (2020). *Boletín del museo entomológico Francisco Luis Gallego*, 12(2), <https://ciencias.medellin.unal.edu.co/museos/entomologico/images/Boletin/2020-06/Boletn.pdf>

Gao, H., Li, H., Zhang, L., y Hao, M. (2010). Effects of *Tenebrio molitor* L. larva decomposing polystyrene foam, *Advanced Materials Research*, 113, 1972-1975. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.113-116.1972>

García, M., Sanchez, E., Waksman, N., y Saucedo, A. (2022). Fundamentos y analogías para entender mejor la espectroscopía de RMN. *Educación Química*, 33(4), 1-11. <https://www.scielo.org.mx/pdf/eq/v33n4/0187-893X-eq-33-04-3.pdf>

Garzón, J., Rodríguez, J., y Hernández, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Revista Universidad y Salud*, 19(2), 309-318. <http://dx.doi.org/10.22267/rus.171902.93>

Geum, H., y Jung, N. (2015). Developmental characteristics of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae in different instars. *International Journal of Industrial Entomology*, 30(2), 45-49. <http://dx.doi.org/10.7852/ijie.2015.30.2.45>

Ghosh, R., Chatterjee, S., y Mandal, N. (2020). Chapter 20 - *Stenotrophomonas*, (Eds) N. Amaresan, M. Senthil Kumar, K. Annapurna, Krishna Kumar, A. Sankaranarayanan, Beneficial Microbes in Agro-Ecology, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00020-4>

Gomez, E., Brito, H., Lopez, U., Salaya, J., Hernandez, R., Gomez, R., y Cruz, A. (2020). The morphological and molecular characterization of *Trichoderma* spp. in cocoa

- agroforestry system. *Open Science Journal*, 5(4), 1-8.
<http://dx.doi.org/10.23954/osj.v5i4.2407>
- Grassi, V., Forte, M., y Pizzol, M. (2001). Aspectos morfológicos e relação estrutura-propriedades de poliestireno de alto impacto. *Polímeros*, 11(3), 158–168.
<https://doi.org/10.1590/s0104-14282001000300016>
- Greczynski, G., y Hultman, L. (2020). X-ray photoelectron spectroscopy: Towards reliable binding energy referencing. *In Progress in Materials Science*, 107.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100591>
- Hagstrum, D., Klejdysz, T., Subramanyam, B., y Nawrot, J. (2013). Atlas of stored-product insects and mites. *AACC International*, 589.
<https://www.sciencedirect.com/book/9781891127755/atlas-of-stored-product-insects-and-mites>
- Han, H., y Han, H. (2021). FTIR analysis of biodegradation of polystyrene by intestinal bacteria isolated from *Zophobas morio* and *Tenebrio molitor*. *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, 17, 50-57.
<http://dx.doi.org/10.46604/peti.2021.5450>
- Hernández, S., Martínez, J., y Pérez, L. (2015). Bacterias hidrocarbonoclasticas biodegradantes de poliestireno expandido. *Foresta Veracruzana*, 17(2), 21-28.
<https://www.redalyc.org/pdf/497/49743956003.pdf>
- 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>

- Ho, B., Roberts, T., y Lucas, S. (2018). An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(2), 308-320. <http://dx.doi.org/10.1080/07388551.2017.1355293>
- Hou, L., y Majumder, E. (2021). Potential for and distribution of enzymatic biodegradation of polystyrene by environmental microorganisms. *Materials*, 14(3), 1-10. <https://doi.org/10.3390/ma14030503>
- Huang, X., Li., y Lim, K. (2021). Investigating the plastic decomposing ability of *Tenebrio molitor* using carbon dioxide sensors. *APD Trove*, 4, 1-11. <https://repository.nie.edu.sg/bitstream/10497/22595/5/APD%20Trove-4-1.pdf>
- Instituto Regional de Investigación de Recursos Naturales, IRPEN. (2019). *Poliestireno: Estándar (GPPS) y Alto impacto (HIPS)*. <https://irpen.wordpress.com/2019/02/27/poliestireno-estandar-gpps-y-alto-impacto-hips/>
- Ivanov, S. (2007). *Plesiophthalmus davidis* Fairm., 1878 (Tenebrionidae). <https://www.zin.ru/animalia/coleoptera/eng/pledavsi.htm>
- Jang, M., Shim, W., Han, G., Rani, M., Song, Y., y Hong, S. (2016). Styrofoam debris as a source of hazardous additives for marine organisms. *Environmental Science & Technology*, 50(10), 495-4960. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b05485>
- Jiang, S., Su, T., Zhao, J., y Wang, Z. (2021a). Isolation, identification, and characterization of polystyrene-degrading bacteria from the gut of *Galleria Mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae) larvae. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 1-9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.736062>
- Jiang, S., Su, T., Zhao, J., y Wang, Z. (2021b). Biodegradation of polystyrene by *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella* and *Zophobas atratus* larvae and comparison of their degradation effects. *Polymers*, 13, 1-13. <https://doi.org/10.3390/polym13203539>

- Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M., y Klobucar, G. (2019). Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*. *Environmental Pollution*, 250, 831-838. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.055>
- Jiayuan, Q., Yu, F., Xiaoju, L., y Zhiyong, Z. (2021). Precise species identification for *Acinetobacter*: a genomebased study with description of two novel *Acinetobacter* Species. *American Society For Microbiology*, 6(3), 1-16. <https://journals.asm.org/journal/msystems>
- Jímenez, G. (2020). *Familia de insectos de Nicaragua*. <https://repositorio.una.edu.ni/4172/1/nh10j61ed.pdf>
- Kandi, V., Palange, P., Vaish, R., Bhatti, B., Kale, V., Kandi, R., y Bhoomagiri, R. (2016). Emerging bacterial infection: identification and clinical significance of *Kocuria* Species. *Open Access Review*, 8(8), 1-6. <https://doi.org/10.7759%2Fcureus.731>
- Kaur, C., Kaur, I., Raichand, R., Chandra, T., y Mayilraj, S. (2011). Description of a novel Actinobacterium *Kocuria assamensis* sp. nov., isolated from a water sample collected from the river Brahmaputra, Assam, India. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 1-6. 10.1007/s10482-010-9547-9
- Ken, S., Xian, S., Yi, J., Lin, Z., y Xing, Z. (2020). Method for zero-waste circular economy using worms for plastic agriculture: augmenting polystyrene consumption and plant growth. *The Preprint Server For Biology*, 1-11. <https://doi.org/10.1101/2020.05.29.123521>
- Khan, I., Prakash, A., y Agashe, D. (2016). Divergent immune priming responses across flour beetle lif stages and populations. *Ecology and Evolution*, 6, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.2532>
- Khan, S., Dong, Y., Nadir, S., Schaefer, D., Mortimer, P., Xu, J., Ye, L., Gui, H., Wanasinghe, D., Dossa, G., Yu, M., y Sheng, Y. (2021). Valorizing plastic waste by

insect consumption. *Circular Agricultural Systems*, 1(7), 1-9.

<https://doi.org/10.48130/CAS-2021-0007>

Kik, K., Bukowska, B., y Sicinska, P. (2020). Polystyrene nanoparticles: sources, occurrence in the environment, distribution in tissues, accumulation and toxicity to various organisms. *Environmental Pollution*, 262, 114-297.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114297>

Kundungal, H., Synshiang, K., y Purushothaman, S. (2021). Biodegradation of polystyrene wastes by a newly reported honey bee pest *Uloma* sp. larvae: an insight to the ability of polystyrene-fed larvae to complete its life cycle. *Environmental Challenges*, 4, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100083>

Kwadha, C., Ongham, G., Ndegwa, P., Raina, S., Fombong, A. (2017). The biology and control of the greater wax moth, *Galleria mellonella*. *Insects*, 8(61), 1-17.

<http://dx.doi.org/10.3390/insects8020061>

Kwon, B., Koizumi, K., Chung, S., Koder, Y., Kim, J., y Saido, K. (2015). Global styrene oligomers monitoring as new chemical contamination from polystyrene plastic marine pollution. *Journal of Hazardous Materials*, 300, 359-367. [https://sci-](https://sci-hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389415005762)

[hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389415005762](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389415005762)

Lalucat, J., Mulet, M., Gomila, M., y García, E. (2020). Genomics in bacterial taxonomy: impact on the genus *Pseudomonas*. *Genes*, 11(2), 1-17.

<https://doi.org/10.3390/genes11020139>

Leluk, K., Hanus, B., Rybak, J., y Bożek, M. (2017). The effectiveness of the biodegradation of raw and processed polystyrene by mealworms. *E3S Web of Conferences*, 22, 1-10.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200103>

- Liaqat, S., Hussain, M., Faheem, M., Aslam, A., y Mumtaz, K. (2020). Microbial ecology: a new perspective of plastic degradation. *Pure and Applied Biology*, 9(4), 2138-2150.
<http://dx.doi.org/10.19045/bspab.2020.90228>
- Liu, L., Feng, Y., Wei, L., Qiao, F., y Zong, Z. (2020). Precise species identification and taxonomy update for the genus *Kluyvera* with reporting *Kluyvera sichuanensis* sp. nov. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.579306>
- 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>
- Long, Z., Kuo, T., y Han, H. (2017). The study of the microbes degraded polystyrene. *Advances in Technology Innovation*, 2(1), 13-17.
<https://ojs.imeti.org/index.php/AITI/article/view/204/324>
- Lopardo, H., Predari, S., y Vay, C. (2016). *Manual de microbiología clínica de la asociación Argentina de microbiología: Enterobacterias*. <https://www.aam.org.ar/descarga-archivos/Parte21Enterobacterias.pdf>
- Lori, S. (2014). La familia Enterococcaceae. En: Rosenberg, E., DeLong, EF, Lory, S., Stackebrandt, E., Thompson, F. (Eds) *The Prokaryotes*. Springer, Berlín, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-30120-9_346
- Lori, S. (2014). La familia Streptococcaceae. En: Rosenberg, E., DeLong, EF, Lory, S., Stackebrandt, E., Thompson, F. (Eds) *The Prokaryotes*. Springer, Berlín, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-30120-9_345
- Lou, Y., Ekaterina, P., Yang, S., Lu, B., Liu, B., Ren, N., Corvini, P., y Xing, D. (2020). Biodegradation of polyethylene and polystyrene by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella* L.) and the effect of co-diet supplementation on the core gut microbiome.

Environmental Science & Technology, 54, 2821-2831.

<https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.9b07044?ref=pdf>

Lou, Y., Li, Y., Lu, B., Liu, Q., Yang, S., Liu, B., Ren, N., Wu, W., y Xing, D. (2021).

Response of the yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) gut microbiome to diet shifts during polystyrene and polyethylene biodegradation. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126222>

Loxdale, H. (2016). Insect science a vulnerable discipline? *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 159(2), 1-14. <http://dx.doi.org/10.1111/eea.12421>

Malawi, A., Garcia, A., Khlystov, N., Wu, W., y Criddle, C. (2021). Enhanced bioavailability and microbial Biodegradation of polystyrene in an enrichment derived from the gut microbiome of *Tenebrio molitor* (Mealworm Larvae). *Environmental Science & Technology*, 5(3), 2027-2036. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c04952>

Mallick, B., Mondal, P., y Dutta, M. (2021). Mallick, B., Mondal, P. & Dutta, M.

Morphological, biological, and genomic characterization of a newly isolated lytic phage Sfk20 infecting *Shigella flexneri*, *Shigella sonnei* and *Shigella dysenteriae*1. *Scientific Report*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98910-z>

Mandic, I., Stefanic, P., y Van, E. (2015). Ecology of Bacillaceae. *Microbiol Spectrum*, 3(1), 1-26. <http://dx.doi.org/10.1128/microbiolspec.TBS-0017-2013>

Mari, J. (2015). *Insectos de Puerto Rico*.

Edicionesdigitales.info.<https://issuu.com/coleccionpuertorriquena/docs/insectos/57>

Martínez, B., Infante, D., y Peteira, B. (2015). Taxonomía polifásica y variabilidad en el género *Trichoderma*. *Revista de Protección Vegetal*, 30, 11-22. <http://scielo.sld.cu/pdf/rpv/v30s1/rpv004s15.pdf>

- Masumoto, K. (2009). Additions to *Plesiophthalmus* and its allied genera (Coleoptera, Tenebrionidae, Amarygmini) from east Asia, Part 4. *Elytra*, 37(1), 105-141.
[http://coleoptera.sakura.ne.jp/Elytra/37\(1\)105MasumotoK_&_AkitaK.pdf](http://coleoptera.sakura.ne.jp/Elytra/37(1)105MasumotoK_&_AkitaK.pdf)
- Matyja, K., Rybak, J., Hanus, B., Wrobel, M., y Rutkowski, R. (2020). Effects of polystyrene diet on *Tenebrio molitor* larval growth, development and survival: dynamic energy budget (DEB) model analysis. *Environmental Pollution*, 264, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114740>
- McBride, M. (2014). La Familia Flavobacteriaceae. En: Rosenberg, E., DeLong, EF, Lory, S., Stackebrandt, E., Thompson, F. (Eds) The Prokaryotes. Springer, Berlín, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38954-2_130
- Medeiros, A., Tomoto. A., Bernardino, J., Bragion, G, Garbin, B., Borges, G., y Vinicius, I. (2018). Biodegradação de poliestireno expandido utilizando *Tenebrio molitor* Linnaeus, 1758 (Coleoptera: Tenebrionidae) e *Zophobas morio* Fabricius, 1776 (Coleoptera: Tenebrionidae). *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 5(9), 271-279. <https://doi.org/10.21438/rbgas.050918>
- Min, H., Rae, H., Jeon, E., Cheol, E., Lee, S., Li, J. y Kim, D. (2020). Evaluation of the biodegradation efficiency of four various types of plastics by *Pseudomonas aeruginosa* isolated from the gut extract of superworms. *Microorganisms*, 8(9), 1-12.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms8091341>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, MARM. (2009). *Producción de polímeros*, 1-290. <https://prtres.es/Data/images/PRODUCCI%C3%93N%20DE%20POL%C3%8DMEROS-1BDCAAE0950F2E40.pdf>
- Mohan, A., Sekhar, V., Bhaskar, K., y Nampoothiri, K. (2016). Microbial assisted high impact polystyrene (HIPS) degradation. *Bioresource Technology*, 213, 204-207.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.021>

- Mohanan, N., Montazer, Z., Sharma, P., y Levin, D. (2020). Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. *Frontiers in Microbiology*, 26, 1-22.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.580709>
- Mondragón, I. (2021). Dimorfismo sexual de *Zophobas morio* (Fabricius, 1776) (Coleoptera, Tenebrionidae) en las etapas de pupa y de adulto. *Ingeniería y Región*, 25, 22-31.
<https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/2703>
- Monteys, V. (2011). *Control de alphetobius diaperinus (col. Tenebrionidae) en granjas avícolas. Universidad Autónoma de Barcelona*. <https://seleccionesavicolas.com/pdf-files/2011/8/6216-control-de-alphetobius-diaperinus-col.-tenebrionidae-en-granjas-avicolas.pdf>
- Moretti, C., Hosni, T., Vandemeulebroecke, K., Brady, C., Vos, P., Buonauro, R., y Cleenwerck, I. (2011). *Erwinia oleae* sp. nov., aislado de nudos del olivo causados por *Pseudomonas savastanoi* pv. *Savastanoi*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 61, 2745–2752. <https://doi.org/10.1099/ijls.0.026336-0>
- Murray, T. (2006). *Phylum Arthropoda-Artrópodos*. Buguide.
<https://bugguide.net/node/view/3/bgpape>
- Nadein, K., Kovalev, A., Thøgersen, J., Weidner, T., y Gorb, S. (2021). Insects use lubricants to minimize friction and wear in leg joints. *Proceedings of the Royal Society: Biological Sciences*, 288, 1-8. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2021.1065>
- Neill, D., y Cortez, L. (2018). *Procesos y Fundamentos de la Investigación Científica*. Universidad Técnica de Machala, UTMACH.
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/12498/1/Procesos-y-FundamentosDeLainvestiacionCientifica.pdf>
- Noel, R. Krieg, J., Staley, T., Brown, D., Hedlund, B., Paster, B., Ward, N., Ludwig, W., y Whitman, W. (2010). *BERGEY'S MANUAL OF Systematic Bacteriology*, vol 4.

https://jabega.uma.es/discovery/fulldisplay?docid=alma991002787269704986&context=L&vid=34CBUA_UMA:VU1&lang=es&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default&query=sub,exact,Medio%20ambiente%20--%20Microbiologi%CC%81a,AND&mode=advanced

Nukmal, N., Umar, S., Amanda, P., y Kanedi, M. (2018). Effect of styrofoam waste feeds on the growth, development and fecundity of mealworms (*Tenebrio molitor*). *OnLine Journal of Biological Sciences*, 18(1), 24-28.

<http://dx.doi.org/10.3844/ojbsci.2018.24.28>

Octavia, S., y Lan, R. (2014). La Familia Enterobacteriaceae. En: Rosenberg, E., DeLong, EF, Lory, S., Stackebrandt, E., Thompson, F. (Eds) *The Prokaryotes*. Springer, Berlín, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38922-1_167

Organización de las Naciones Unidas, ONU. (2017). *Plásticos de un solo uso*.

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25496/singleUsePlastic_SP.pdf?isAllowed=y&sequence=2

Organización no Gubernamental, GREENPEACE. (2016). *Plásticos en los océanos. Datos, comparativas e impactos*. http://archivo.es.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos_en_los_océanos_LR.pdf

Ormachea, O y Villazón, A. (2017). Desarrollo de un microscopio de epifluorescencia de bajo costo. *Investigación y Desarrollo*, No, 17(1), 5 – 14. 10.23881/idupbo.017.1-1i

Oromí, P. (2018). Tardigrada, Pseudoescorpiones, Chilopoda, Diplopoda, Pauropoda, Symphyla y Coleoptera. En: Lista de especies silvestres terrestres y marinas de Canarias. <https://www.biodiversidadcanarias.es/biota/especie/A04210>

Page M., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutronc, 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://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Palmer, K., Lauder, K., Christopher, K., Guerra, F., Welch, R., y Bertuccio, A. (2022). Biodegradation of expanded polystyrene by larval and adult stages of *Tenebrio molitor* with varying substrates and beddings. *Environmental Processes*, 9(1), 1-15.
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8758922/pdf/40710_2021_Article_556.pdf/?tool=EBI
- Peng, B., Li, Y., Fan, R., Chen, Z., Chen, J., Brandon, A., Criddle, C., Zhang, Y., y Wu, W. (2020). Biodegradation of low-density polyethylene and polystyrene in superworms, larvae of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae): broad and limited extent depolymerization. *Environmental Pollution*, 266, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115206>
- Peng, B., Su, Y., Chen, Z., Chen, J., Zhou, X., Benbow, M., Criddle, C., Wu, W., y Zhang, Y. (2019). Biodegradation of polystyrene by dark (*Tenebrio obscurus*) and yellow (*Tenebrio molitor*) mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae). *Environmental Science & Technology*, 53 (9), 5256-5265. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06963>
- Peña, P., López, N., y Ballen, M. (2020). *Tenebrio molitor* and its gut bacteria growth in polystyrene (PS) presence as the sole source carbon. *Universitas Scientiarum*, 25 (1), 37-53. <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.SC25-1.tmai>
- Pérez, I. (2020). Identificación de coliformes en el canal de aguas lluvias de la universidad distrital, sede vivero. *Boletín Semillas Ambientales*, 14(1), 52– 74.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/bsa/article/download/16923/15998/89366>

- Pérez, N., Paul, G., Anguas, G., Salazar, A., Juárez, R., y Mondragón, F. (2016). *Evaluación de las propiedades mecánicas del poliestireno expandido*, 1-79.
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt476.pdf>
- Poletto, M., Dettenborn, J., Zeni, M., y Zattera, A. (2011). Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. *Waste Management*, 31(4), 779–784.
https://www.researchgate.net/publication/49697212_Characterization_of_composites
- Portela, D., Chaparro, D., y López, S. (2013). La biotecnología de *Bacillus thuringiensis* en la agricultura. *Publicación Científica en Ciencias Biomédicas*, 11(20).
<http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v11n20/v11n20a09.pdf>
- Poveda, J. (2019). Los microorganismos asociados a los insectos y su aplicación en la agricultura. *Revista Digital Universitaria*, 20(1), 1-15.
<http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n1.a2>
- Pradera, C. (2019). *Tenebrio Obscurus (Coleoptera, Tenebrionidae) en un gallinero de mañanet de la selva. El desinsetador y desratinizador*.
<https://desinsectador.com/2019/03/27/tenebrio-obscurus-coleoptera-tenebrionidae-en-un-gallinero-de-macanet-de-la-selva/>
- Pratondo, A., y Bramantoro, A. (2022). Classification of *Zophobas morio* and *Tenebrio molitor* using transfer learning. *PeerJ Computer Science*, 1-15.
<http://dx.doi.org/10.7717/peerj-cs.884>
- Przemieniecki, S., Kosewska, A., Ciesielski, A., y Kosewska, O. (2020). Changes in the gut microbiome and enzymatic profile of *Tenebrio molitor* larvae biodegrading cellulose, polyethylene and polystyrene waste. *Environmental Pollution*, 256, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113265>

- 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>
- Rae, H., Min, H., Cheol, H., Yu, Jeon, E., Lee, S., Li, J., y Hwan, D. (2020). Biodegradation of polystyrene by *Pseudomonas* sp. isolated from the gut of superworms (larvae of *Zophobas atratus*). *Environmental Science & Technology*, 54, 6987–6996.
<https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c01495?ref=pdf>
- Realpe, M., Hernández, C., y Agudelo, C. (2002). Especies del género *Bacillus*: morfología macroscópica y microscópica. *Biomedicina*, 206-109.
<https://revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/download/1148/1263/0>
- Regassa, LB (2014). La familia Spiroplasmataceae. En: Rosenberg, E., DeLong, EF, Lory, S., Stackebrandt, E., Thompson, F. (Eds) *The Prokaryotes*. Springer, Berlín, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-30120-9_389
- Reyes, N., Sánchez, J., Salas, E., Salvatierra, E., Díaz, N., Ramos, D. (2020). *Enterococcus faecalis*: patógeno de relevancia en los fracasos de tratamiento endodóntico. *Revista Kiru*, 17(3), 169-174. <https://doi.org/10.24265/kiru.2020.v17n3.08>
- Reynoso, P., y Danón, C. (2016). Procedimiento de calibración en temperatura y flujo de calor de un calorímetro diferencial de barrido (DSC). *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 7(4), 17-27. <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323649144003.pdf>
- Rodríguez, A., Ortiz, Y., Hernández, C., y Figueroa, C. (2021). Biodegradación de espumas plásticas por larvas de insectos: ¿una estrategia sustentable? *Revista Especializada en Ciencias Químico Biológicas*, 24, 1-10.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.311>

- Rojas, M., Jaimes, L., y Valencia, M. (2017). Efectividad, eficacia y eficiencia en equipos de trabajo. *Espacios*. <https://www.revistaespacios.com/a18v39n06/a18v39n06p11.pdf>
- Saido, K., Kodera, Y., Kimukai, H., Sato, H., Okabe, A., Koizumi, O., Takatama, K., Kwon, B., Chung, S., Nishimura, M., y Mentese, S. (2020). Waste polystyrene degradation in the world oceans: newly identified sources of contamination. *Physical Sciences*, 1-18. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-83390/v2>
- Sánchez, J. (2021). A toxicological perspective of plastic biodegradation by insect larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C*, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2021.109117>
- Sastri, V. (2010). *Plastics in Medical Devices properties, requirements, and applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2027-6.10006-6>
- Sedláček, I., Holochová, P., Busse, H., Koublová, V., Králová, S., Švec, P., Sobotka, R., Stanková, E., Pilný, J., Šedo, J., Smolíková, J., y Sedlár, V. (2022). Characterisation of waterborne psychrophilic *Massilia* isolates with violacein production and description of *Massilia antarctica* sp. nov. *Microorganisms*, 10, 1-14. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040704>
- Sekhar, V., Nampoothiri, K., Mohan, K., Nair, N., Bhaskar, T., y Pandey, A. (2016). Title: Microbial degradation of high impact polystyrene (HIPS), an e-plastic with decabromodiphenyl oxide and antimony trioxide. *Journal of Hazardous Materials*, 318, 347-354. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.07.008>
- Shah.P., y Pell, J. (2003). Hongos entomopatógenos como agentes de control biológico. *Aplicación Microbiology Biotechnology*, 61(5-6), 413-23. 10.1007/S00253-003-1240-8.

- Sharp, A. (2020). *Breaking down ocean polystyrene, pollution on a global scale* (2020, July 10) retrieved 24 October 2021 from. <https://phys.org/news/2020-07-ocean-polystyrenepollution-global-scale.html>
- Silva, D., Batista, L., Rezende, E., Fungaro, M., Sartori, S., y Alves, E. (2011). Identification of fungi of the Genus *Aspergillus* section *nigri* using polyphasic taxonomy. *Brazilian Journal of Microbiology*, 42, 761-773.
<https://www.scielo.br/j/bjm/a/nZ6gRFdLHQS7XQJk9d5yNzL/?format=pdf>
- Singh, P., y Mazumdar, P. (2022). Chapter 5 - Microbial pesticides: trends, scope and adoption for plant and soil improvement, (Eds): Rakshit, A., Meena, V., Abhilash, P., Sarma, B., Singh, H., Fraceto, L., Parihar, M., Kumar, A. In *Advances in Bio-inoculant Science, Biopesticides*, Woodhead Publishing, 37-71.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823355-9.00023-7>
- 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>
- Sussarellu, R., Suquet, M., Thomas, Y., Lambert, C., Fabioux, C., Pernet, M., Goïc, N., Quillien, V., Minganta, C., Epelboin, Y., Corporeau, C., Guyomarch, J., Robbens, J., Ponta, I., Soudant, P., y Huvet, A. (2016). Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(9), 2430-2435. <https://doi.org/10.1073/pnas.1519019113>
- Tall, M., Lo, C., Yimagou, E., Pham, T., Raoult, T., Fournier, P., Fenollar, F., y Levasseur, P. (2020). Description of *Clostridium cagae* sp. nov., *Clostridium rectalis* sp. nov. and *Hathewayia massiliensis* sp. nov., new anaerobic bacteria isolated from human

- stool samples. *New Microbes and New Infections*, 37, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.nmni.2020.100719>
- Tambong, J. (2019). Taxogenomics and systematics of the genus *Pantoea*. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02463>
- Tan, K., Angzzas, K., Aliff, Razak., y Noor, F. (2021a). *Bacillus megaterium*: a potential and an efficient bio-degrader of polystyrene. *Environmental Sciences*, 64. 1-12.
<https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021190321>
- Tan, M., Mohd, A., Mohd, S., Razak, A., Kamarudin, R. (2021b). Isolation and identification of polystyrene degrading bacteria from *Zophobas morio*'s gut. *Walailak Journal of Science and Technology*, 18(8), 1-20. <https://doi.org/10.48048/wjst.2021.9118>
- Tanaka, Y., y Okuya, Y. (2015). Heating scans of stretched polystyrene films with stable baselines: Preparation method of samples for thermal analysis. *Thermochim. Acta*, 614, 207– 212. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.06.031>
- Teixeira, L., y Merquior, V. (2014). La familia Moraxellaceae. En: Rosenberg, E., DeLong, EF, Lory, S., Stackebrandt, E., Thompson, F. (Eds) *The Prokaryotes*. Springer, Berlín, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38922-1_245
- Telleria, M., Dueñas, M., Melo, I., y Martín, M. (2010). Morphological and molecular studies of hyphodermella in the western mediterranean area. *Mycol Progress*, 9, 585–596.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11557-010-0666-5>
- Toit, M., Huch, M., Cho, G., y Franz, C. (2014). *La familia Streptococcaceae*. Lactic acid bacteria: Biodiversity and taxonomy, first edition. Edited by Wilhelm H. Holzapfel and Brian J.B. Wood, 445-446. doi:10.1002/9781118655252
- Towner, K. (2006). El género *Acinetobacter*. En: Dworkin, M., Falkow, S., Rosenberg, E., Schleifer, KH., Stackebrandt, E. (Eds) *The Prokaryotes*. Springer, Nueva York, NY.
https://doi.org/10.1007/0-387-30746-X_2

- Triplehorn, C., y Johnson, N. (2005). *Borror and delong's introducion del estudio de los insectos*. 7edicion. <https://www.amazon.com/-/es/Norman-F-Johnson/dp/0030968356>
- Tsang, C., Tang, J., Lau, S., y Woo, P. (2018). Taxonomy and evolution of *Aspergillus*, *Penicillium* and *Talaromyces* in theomics era – Past, present and future. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 16, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2018.05.003>
- Tsochatzis, E., Berggreen, E., Tedeschi, F., Ntrallou, K., Gika, H., Y Corredig, M. (2021b). Gut microbiome and degradation product formation during biodegradation of expanded polystyrene by mealworm larvae under different feeding strategies. *Molecules*, 26(24), 1-10. <https://doi.org/10.3390/molecules26247568>
- Tsochatzis, E., Berggreen, I., Nargaard, J., Theodoridis, G., y Dalsgaard, T. (2021a). Biodegradation of expanded polystyrene by mealworm larvae under different feeding strategies evaluated by metabolic profiling using GC-TOF-MS. *Chemosphere*, 281, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021>
- Tsochatzis, E., Lopes, J., Gika, H., y Theodoridis, G. (2020). Polystyrene biodegradation by *Tenebrio molitor* larvae: identification of generated substances using a GC-MS untargeted screening method. *Method. Polymers*, 13(17), 1-10. <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/1/17>
- Úbeda, M., Quiroz, J., Abarca, G., y Maes, J. (2020). Factores que influyen el proceso de metamorfosis de *Zophobas* sp. (Coleoptera: Tenebrionidae) en sistemas de producción de alimento vivo. *Revista Nicaraguense de Entomologia*, 188, 1-24. <http://www.bionica.info/RevNicaEntomo/188-Zophobas.pdf>
- United States Department of Agriculture, USDA. (2016). *Visual Reference Images*. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/VRI2017.pdf>

- Urbanek, A., Rybak, J., Wrobel, M., Leluk, K., y Mironczuk, A. (2020). A comprehensive assessment of microbiome diversity in *Tenebrio molitor* fed with polystyrene waste. *Environmental Pollution*, 262, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114281>
- Valls, J. (2012). El *Alphitobius Diaperinus*, Un Portador De Patógenos. *Selecciones Avícolas*. <https://seleccionesavicolas.com/pdf-files/2012/4/6640-el-alphitobius-diaperinus-un-portador-de-patogenos.pdf>
- Venegas, D. (2017). *Calorimetria diferencial de barrido*. Departamento de ingeniería de materiales. https://www.researchgate.net/profile/Diego-Venegas-Vasconez/publication/316860989_CALORIMETRIA_DIFERENCIAL_DE_BARRIDO/links/5914a4aeaca27200fe4e8a07/CALORIMETRIA-DIFERENCIAL-DE-BARRIDO.pdf
- Vera, V., Choque, B., Lisset, K., Solorzano, G., y Huayllani, B. (2021). Vista de aislamiento de enterobacterias de *Tenebrio molitor* (coleoptera: Tenebrionidae) como organismos degradadores del poliestireno expandido bajo condiciones de laboratorio. *Ciencia latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(6), 1-17. <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/1160/1567>
- Villarreal, M., Villa, M., Cira, L., Estrada, M., Parra, F., y Santos, S. (2018). El género *Bacillus* como agente de control biológico y sus impresiones en la bioseguridad agrícola. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(1). <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-5>
- Vos, P., Garrity, G., Jones, D., Krieg, N., Ludwig, W., Rainey, F., Schleifer, K., y Whitman, W. (2010). *Bergey's manual of systematic bacteriology: 2ht ed. Volume 3: The Firmicutes* (Bergey's Manual of Systematic Bacteriology (Springer-Verlag). <https://www.amazon.com/-/es/Paul-Vos/dp/1493979159>

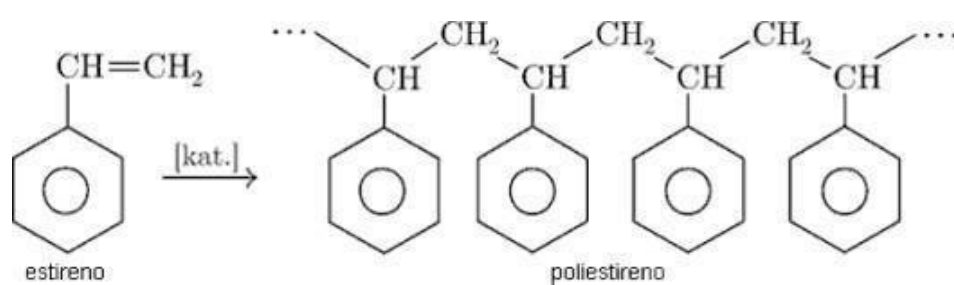
- Wang, K., Liu, M., Wang, Y., Song, W., y Tang, P. (2020a). Identification and functional analysis of cytochrome P450 CYP346 family genes associated with phosphine resistance in *Tribolium castaneum*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 168, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104622>
- Wang, Z., Xin, X., Shi, X., y Zhang, Y. (2020b). A polystyrene-degrading *Acinetobacter* bacterium isolated from the larvae of *Tribolium castaneum*. *Science of the Total Environment*, 726, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138564>
- Watson, J., Wallihan, R., y Antonara. (2018). Enterobacteriaceae encontradas con menos frecuencia. *Principles and Practice of Pediatric Infectious Diseases (Fifth Edition)*, 829-831. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-40181-4.00142-0>
- Wiegel, J. (2015). Clostridiaceae. Manual de sistemática de arqueas y bacterias de Bergey, 1–5. doi:10.1002/9781118960608.fbm001
- Wiegel, W., Tanner, R., y Rainey. (2006). An introduction to the family Clostridiaceae. In: Dworkin, M., Falkow, S., Rosenberg, E., Schleifer, KH., Stackebrandt, (Eds) The Prokaryotes. *Springer*, New York, NY. https://doi.org/10.1007/0-387-30744-3_20
- Williams., W. (1984). *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Octava edición*. Bergey, David Hendrick, and John G. Holt. https://jabega.uma.es/discovery/fulldisplay?docid=alma991004301469704986&context=L&vid=34CBUA_UMA:VU1&lang=es&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default&query=sub,exact,Medio%20ambiente%20--%20Microbiologi%CC%81a,AND&mode=advanced
- Woo, S., Song, I., y Joon, H. (2020). Fast and facile biodegradation of polystyrene by the gut microbial flora of *Plesiophthalmus davidis* larvae. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(18), 1-12. <https://doi.org/10.1128/AEM.01361-20>

- Worzakowska, M. (2015). Thermal and mechanical properties of polystyrene modified with esters derivatives of 3-phenylprop-2-en-1-ol. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 121, 235–243. <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-015-4547-7>
- Yang, S., Brandon, A., Xing, D., Yang, J., Pang, J., Criddle, C., Ren, N., y Wu, W. (2018). Progresses in polystyrene biodegradation and prospects for solutions to plastic waste pollution. *Earth and Environmental Science*, 150, 1-10.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/150/1/012005/pdf>
- Yang, S., Malawi, A., Brandon, Flanagan, J., Yang, J., Ning, D., Cai, C., Fan, H., Wang, Z., Ren, J., Benbow, E., Ren, N., Waymouth, R., Zhou, J., Criddle, S., Wu, W. (2018a). Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus) factors affecting biodegradation rates and the ability of polystyrene-fed larvae to complete their life cycle. *Chemosphere*, 191, 979-989
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.117>
- Yang, S., Wu, W., Brandon, A., Fan, H., Receveur, J., Wang, Y., Fan, R., McClellan, R., Gao, S., Ning, D., Phillips, D., Peng, B., Wang, H., Cai, S., Li, P., Cai, W., Ding, L., Yang, J., Zheng, M... y Criddle, C. (2018b). Ubiquity of polystyrene digestion and biodegradation within yellow mealworms, larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae). *Chemosphere*, 212, 262-271.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.078>
- Yang, Y., Wang, J., y Xia, M. (2020). Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating superworms *Zophobas atratus*.
Science of The Total Environment, 708, 1-24.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135233>
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., Yang, R., y Jiang, L. (2015a). Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: Part

1. chemical and physical characterization and isotopic tests. *Environmental Science & Technology*, 49, 12080–12086. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02661>
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., Yang, R., y Jiang, L. (2015b). biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: part 2. role of gut microorganisms. *Environmental Science & Technology*, 49, 12087–12093. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b02663>
- Yao, B., Huang, R., Zhang, Z., Shi, S. (2022). Seed-borne *Erwinia persicina* affects the growth and physiology of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Frontiers in microbiology*, 13, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.891188>
- Yu, D., Banting, G., y Neumann, N. (2021). A review of the taxonomy, genetics, and biology of the genus *Escherichia* and the type species *Escherichia coli*. *Canadian Journal of Microbiology*, 67, 553-571. <http://dx.doi.org/10.1139/cjm-2020-0508>
- Zamorano, S., Camus, J., y Zavala, M. (2017). Estudio espectroscópico rmn bidimensional de bases de schiff derivadas de la 4-aminoantipirina. *Rvista de la sociedad Química del Perú*, 83(2), 1-11. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v83n2/a10v83n2.pdf>
- Zhao, C., Ren, G., y Wu, F. (2017). A new species of *Hyphodermella* (Polyporales, Basidiomycota) with a poroid hymenophore. *Mycoscience*, 58, 452-456. <http://dx.doi.org/10.1016/j.myc.2017.06.007>

Anexo 1

Polimerización del estireno: Poliestireno



ANEXO 2

Género de microorganismos asociados a insectos degradadores de poliestireno reportados en América, Asia y Europa, 2015-2021

Genero	Phylum	Clase	Orden	Familia	Gram	Forma
<i>Acinetobacter</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Pseudomonadales	Moraxellaceae	G(-)	Cocobacilo
<i>Pseudomonas</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Pseudomonadales	Pseudomonadaceae	G(-)	Bacilo
<i>Exiguobacteria</i>	Firmicutes	Bacilli	Bacillales	Bacillaceae	G(+)	Bacilo
<i>Enterococcus</i>	Firmicutes	Bacilli	Lactobacillales	Enterobacteriaceae	G(+)	Cocos
<i>Kluyvera</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Escherichia</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Shigella</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Serratia</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Enterobacter</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Klebsiella</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Masilia</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Burkholderiales	Oxalobacteraceae	G(-)	Bacilo
<i>Bifidobacteria</i>	Actinobacteria	Actinobacteridae	Bifidobacteriales	Bifidobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Streptococcus</i>	Firmicutes	Bacilli	Lactobacillales	Streptococcaceae	G(+)	Cocos
<i>Alcaligenes</i>	Proteobacteria	Alfaproteobacteria	Burkholderiales	Alcaligenaceae	G(-)	Bacilo
<i>Citrobacter</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Bacillus</i>	Firmicutes	Bacilli	Bacillales	Bacillaceae	G(+)	Bacilo
<i>Stenotrophomonas</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Xanthomonadales	Xanthomonadaceae	G(-)	Bacilo
<i>Pantaea</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Erwinia</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Erwiniaceae	G(-)	Bacilo
<i>Clostridium</i>	Firmicutes	Clostridia	Clostridiales	Clostridiaceae	G(+)	Bacilo
<i>Flavobacteria</i>	Bacteroidetes	Bacteroidia	Flavobacteriales	Flavobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Lactococcus</i>	Firmicutes	Bacilli	Lactobacillales	Streptococcaceae	G(+)	Cocos
<i>Espiroplasma</i>	Tenericutes	Mollicutes	Entomoplasmatales	Spiroplasmataceae	G(+)	Espiral
<i>Cronobacter</i>	Proteobacteria	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	G(-)	Bacilo
<i>Kocuria</i>	Actinobacteria	Actinobacteria	Micrococcales	Micrococcaceae	G(+)	Cocos
Hongos						
<i>Aspergillus</i>	Ascomycota	Eurotiomycetes	Eurotiales	Trichocomaceae		
<i>Hyphodermella</i>	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Phanerochaetaceae		
<i>Trichoderma</i>	Eumycota	Euscomycetes	Hypocreales	Hypocraceae		