

Degradación del poliestireno por insectos y microorganismos asociados: Análisis bibliométrico y una revisión narrativa de las técnicas utilizadas en la caracterización

Degradation of polystyrene by insects and associated microorganisms: bibliometric analysis and a narrative review of techniques used in characterization

Carmen Carreño-Farfán¹; Marilín Sánchez Purihumán¹; Teresa Oriele Barrios-Mendoza³;
Isis Cristel Córdova-Barrios⁴; Segundo Vásquez Llanos²; Pedro Córdova-Mendoza⁴;
Ada Patricia Barturén Quispe^{2,*}

- 1 Grupo de Investigación BlyME: BS-CA, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú.
2 Grupo de Investigación CIMAYDS, Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú.
3 Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica, Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Ica, Perú.
4 Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Ica, Perú.

* Autor correspondiente: abarturen@unprg.edu.pe (A. P. Barturén Quispe).

ORCID de los autores:

C. Carreño-Farfán: <https://orcid.org/0000-0003-0238-2666>
T. O. Barrios-Mendoza: <https://orcid.org/0000-0002-6466-7766>
S. Vásquez Llanos: <https://orcid.org/0000-0002-3937-9674>
A. P. Barturén Quispe: <https://orcid.org/0000-0003-4566-1868>

M. Sánchez Parihumán: <https://orcid.org/0000-0001-9252-9566>
I. C. Córdova-Barrios: <https://orcid.org/0000-0002-3569-2671>
P. Córdova-Mendoza: <https://orcid.org/0000-0003-3612-1149>

RESUMEN

El poliestireno, conocido por su resistencia a la degradación, constituye una fuente importante de contaminación ambiental. Sin embargo, se ha descubierto que ciertos insectos y microorganismos asociados lo degradan, utilizando este material como fuente de carbono y energía. Por tanto, el objetivo de esta revisión es evaluar críticamente las técnicas de caracterización utilizadas para analizar la biodegradación del poliestireno por insectos y microorganismos asociados. Se busca identificar las fortalezas y limitaciones de estas técnicas, así como su contribución al conocimiento de la degradación del poliestireno en un contexto ambiental. Se realizó un análisis bibliométrico y una revisión sistemática basada en el método PRISMA, analizando 100 artículos de la base de datos Scopus y 83 de la Web of Science entre 2015 y 2023. El método estadístico aplicado a los metadatos fue bibliométrico con aspectos cualitativos y cuantitativos. Los resultados demostraron que las técnicas de caracterización aplicadas, como la microscopía de barrido electrónico, mostraron la formación de biopelículas microbianas en la superficie y cavidades del poliestireno biodegradado. Así mismo, la cromatografía de permeación en gel indicó cambios en la morfología del poliestireno biodegradado. Finalmente, la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y la resonancia magnética nuclear de protones (H-NMR) demostraron signos de oxidación, despolimerización e incorporación de oxígeno a la cadena de hidrocarburos del poliestireno debido al proceso de degradación. Estos resultados enfatizan la efectividad de las técnicas de caracterización para detectar y describir cambios significativos en el poliestireno durante su biodegradación. Su comprensión es crucial para futuras investigaciones y la evaluación del impacto ecológico de la degradación del poliestireno por organismos biodegradadores.

Palabras clave: degradación de poliestireno; microorganismos asociados; técnicas de caracterización; análisis bibliométrico; contaminación ambiental por poliestireno.

ABSTRACT

Polystyrene, known for its resistance to biodegradation, constitutes a significant source of environmental pollution. However, certain insects and associated microorganisms have been found to degrade it, using this material as a source of carbon and energy. Therefore, the objective of this review is to critically evaluate the characterization techniques used to analyze the biodegradation of polystyrene by insects and associated microorganisms. The aim is to identify the strengths and limitations of these techniques, as well as their contribution to the knowledge of polystyrene degradation in an environmental context. A bibliometric analysis and a systematic review based on the PRISMA method were carried out, analyzing 100 articles from the Scopus database and 83 from the Web of Science between 2015 and 2023. The statistical method applied to the metadata was bibliometric with qualitative and quantitative aspects. The results demonstrated that the applied characterization techniques, such as scanning electron microscopy showed the formation of microbial biofilms on the surface and cavities of the biodegraded polystyrene. Likewise, gel permeation chromatography indicated changes in the morphology of the biodegraded polystyrene. Finally, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and proton nuclear magnetic resonance (H-NMR) demonstrated that signs of oxidation, depolymerization, and the incorporation of oxygen into the hydrocarbon chain of polystyrene due to the degradation process. These results emphasize the effectiveness of characterization techniques in detecting and describing significant changes in polystyrene during its biodegradation. Its understanding is crucial for future research and the evaluation of the ecological impact of polystyrene degradation by biodegrading organisms.

Keywords: polystyrene degradation; associated microorganisms; characterization techniques; bibliometric analysis; environmental pollution by polystyrene.

Recibido: 10-05-2024.

Aceptado: 25-08-2024.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

Desde 1950, se estima que se han generado en promedio 6 300 millones de toneladas de residuos plásticos (Rosenboom et al., 2022). Sin embargo, en los últimos años, se ha buscado alternativas para sustituir los plásticos y eliminar los pasivos ambientales causados por su incorrecta disposición y resistencia a la biodegradación (Massuga et al., 2022). En Latinoamérica, se arrojan 17 000 toneladas de plástico al océano (López Aguirre et al., 2020). América del sur ocupa el tercer lugar a nivel mundial en cuanto a la contribución de residuos plásticos al océano. Perú lidera esta lista, seguida de Venezuela y Argentina con 0,44; 0,25 y 0,18 kg per cápita por día, respectivamente (Castañeta et al., 2020).

El poliestireno es un polímero ampliamente utilizado por su naturaleza rígida, peso ligero y bajo costo. Este polímero se encuentra en una amplia gama de aplicaciones que van desde envases de alimentos y embalaje hasta juguetes, construcción y electrónica. Cabe destacar que se ha detectado la presencia de poliestireno en el suelo a profundidades que varían de 0 a 30 cm (Dioses-Salinas et al., 2020) y 100-300 micropásticos menores de 500 μm por kg de suelo de áreas residenciales (Yoon et al., 2024). La presencia de poliestireno en el suelo también genera efectos perjudiciales en la agricultura, bloquea el transporte de nutrientes en las plantas, altera la fotosíntesis de *Cucumis sativus* L. (Zhuang et al., 2024), y reduce el contenido de clorofila de plántulas de *Oryza sativa* L. (Iswahyudi et al., 2024), el crecimiento de *Amaranthus tricolor* L. (Rana et al., 2024) y el rendimiento de *Vigna radiata* L. (Fu et al., 2023). Además, se ha observado que en *Rattus rattus* alimentadas por sonda con nanopartículas de PS los polímeros se acumularon en los testículos y redujeron la calidad de la esperma, las hormonas reproductivas séricas y los coeficientes testiculares (Yin et al., 2024) y en *Mus musculus* expuestos a estos contaminantes se observó alteración en la función de los ovarios, disminución en la calidad oocitos y por lo tanto reducción en la fertilidad (Yue et al., 2024).

La presencia de poliestireno en los océanos plantea graves preocupaciones, porque se ha demostrado en la cianobacteria *Crocospaera watsonii* reducción del crecimiento, tasa de fotosíntesis y fijación de nitrógeno (Lixia et al., 2024), en *Danio rerio* desregulación de los genes asociados a los neurotransmisores y el metabolismo de ácidos grasos (Shubham et al., 2024), en *Mytilus coruscus* estrés fisiológico y aumento significativo de las actividades enzimáticas relacionadas con el estrés oxidativo (Zhen et al., 2024) y en *Ruditapes decussatus* toxicidad en la hemolinfa y glándulas digestivas (Ventura et al., 2024). Además, en la atmósfera también se han detectado micropartículas de poliestireno, que pueden ser inhaladas por organismos vivos, lo que conduce a una serie de problemas de granulomas y fibrosis. Este fenómeno está relacionado con la proliferación celular continua y la generación de especies reactivas de oxígeno, lo que conduce al estrés oxidativo (Amato-Lourenço et al., 2020). Se ha estimado que las personas ingieren alrededor de

133 mg de partículas de poliestireno al año (Hwang et al., 2020). Estos hallazgos resaltan la necesidad de abordar los efectos perjudiciales del poliestireno en el medio ambiente y en la salud.

En la naturaleza, existen larvas de insectos como el *Tenebrio molitor* (Pham et al., 2023; Yang et al., 2023; Machona et al., 2022), *Uloma* sp. (Kundungal et al., 2021), *T. castaneum*, *Zophobas morio* (Guangorena & Kobayashi, 2024), *Z. atratus* (Lu et al., 2024), *Alphitobius diaperinus* (Cucini et al., 2022), *Galleria mellonella* (Young et al., 2024), *Pleisophthalmus davidis* (Woo et al., 2020), y también microorganismos de los géneros Acinetobacter, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Klebsiella*, y *Citrobacter*, entre otros, que tienen la capacidad de degradar el poliestireno, debido que utilizan este polímero como fuente de carbono y energía (Sufang et al., 2024; Lee et al., 2020; Machona et al., 2022; Marmanillo et al., 2021; Urbanek et al., 2020).

Las características del poliestireno biodegradado se determinan por el polímero presente en el contenido intestinal (Tsochatzis et al., 2021) o en las excretas de las larvas que participan en la degradación, así como en el polímero residual que se encuentra en los cultivos de bacterias previamente aisladas del intestino de estas larvas (Brandon et al., 2021). Estas observaciones muestran la capacidad de ciertos microorganismos para degradar el poliestireno, lo que ofrece perspectivas interesantes para el desarrollo de estrategias de gestión de residuos más sostenibles y la comprensión de los procesos de biodegradación del poliestireno.

Las características observables de degradación del poliestireno incluyen cambios morfológicos, como la formación de agujeros en su estructura (Yolanda et al., 2024; Woo et al., 2020) y la aparición de biopelículas microbianas adheridas a su superficie (Kim et al., 2020), hasta la pérdida de sus propiedades hidrofóbicas (Wang et al., 2020), reducción de peso (Palmer et al., 2022), modificaciones térmicas (Kundungal et al., 2021), alteraciones en los parámetros moleculares (Wang et al., 2024; Peng et al., 2020), cambios en la composición elemental en la superficie (Kim et al., 2020) y presencia de grupos funcionales (Lv et al., 2024; Wang et al., 2024), entre otros efectos observados. Para la caracterización de la degradación del poliestireno, se emplean diversas técnicas Analíticas. Estas incluyen la microscopía de barrido electrónico, la cromatografía de permeación en gel, la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, la termogravimetría y la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (Wang et al., 2024; Yolanda et al., 2024; Yang et al., 2018). Estas técnicas analíticas son fundamentales para comprender y documentar los cambios en las propiedades del poliestireno durante el proceso de degradación, lo que contribuye al conocimiento en la gestión sostenible de este polímero y su impacto en el medio ambiente.

El propósito de esta investigación fue analizar las características diferenciales del poliestireno degradado por insectos y microorganismos asociados, utilizando la información recopilada entre 2015 y

2023 de las bases de datos de Scopus y Web of Science, mediante el uso de técnicas de caracterización. Este análisis consiste en proporcionar un marco de referencia sólido para la realización de futuros experimentos que verifiquen la biodegradación del poliestireno. Dadas las limitaciones presupuestarias y la disponibilidad de equipos de última generación, los investigadores deben tomar

decisiones informadas sobre la elección de las técnicas analíticas que proporcionen la mayor cantidad de información al menor costo durante los ensayos de biodegradación de poliestireno y otros polímeros plásticos contaminantes por parte de microorganismos e insectos. Esta investigación contribuye al entendimiento de las propiedades cambiantes del poliestireno biodegradado.

METODOLOGÍA

Criterio de Selección

Los criterios de inclusión incluyeron investigaciones experimentales que informaran sobre insectos y microorganismos asociados que actúan como degradadores de poliestireno. Se aplicaron criterios de exclusión para descartar investigaciones bibliográficas que mencionaran insectos y microorganismos asociados como degradadores de poliestireno, así como microorganismos que no estuvieran relacionados con insectos y que también fueron reportados como degradadores de poliestireno. Estos criterios de selección se aplicaron para garantizar la precisión y relevancia de los datos recopilados en la investigación. En la Figura 1 se presenta un esquema de la revisión bibliométrica de las principales técnicas de caracterización del poliestireno degradado mediante biodegradadores.

Procedimiento

Para la búsqueda de literatura científica, se utilizaron las bases de datos Scopus y Web of Science, aplicando palabras clave específicas: polystyrene AND insects. Esta búsqueda se limitó al periodo de 2015 a 2023 y se restringió el tipo de

documento a artículo. A partir de 2015 se incrementó el número de publicaciones sobre degradación del PS por insectos y microorganismos asociados según los resultados preliminares de la búsqueda en las bases de datos Scopus y Web of Science. El protocolo de búsqueda se estableció utilizando palabras claves y operadores booleanos, siguiendo la siguiente estructura: (TITLE-ABS-KEY (polystyrene AND insects) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2023) OR (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")))). El análisis PRISMA se aplicó siguiendo el procedimiento de Page et al. (2021). Los artículos científicos se exportaron a hojas de Excel, para cada una de la base de datos, se integró la información, se eliminaron duplicados, se evaluó la pertinencia calculada en el título y el resumen, y se determinaron la accesibilidad de los documentos. Estos datos se resumieron en un diagrama de flujo que representa las diferentes etapas del análisis, como se observa en la Figura 2.

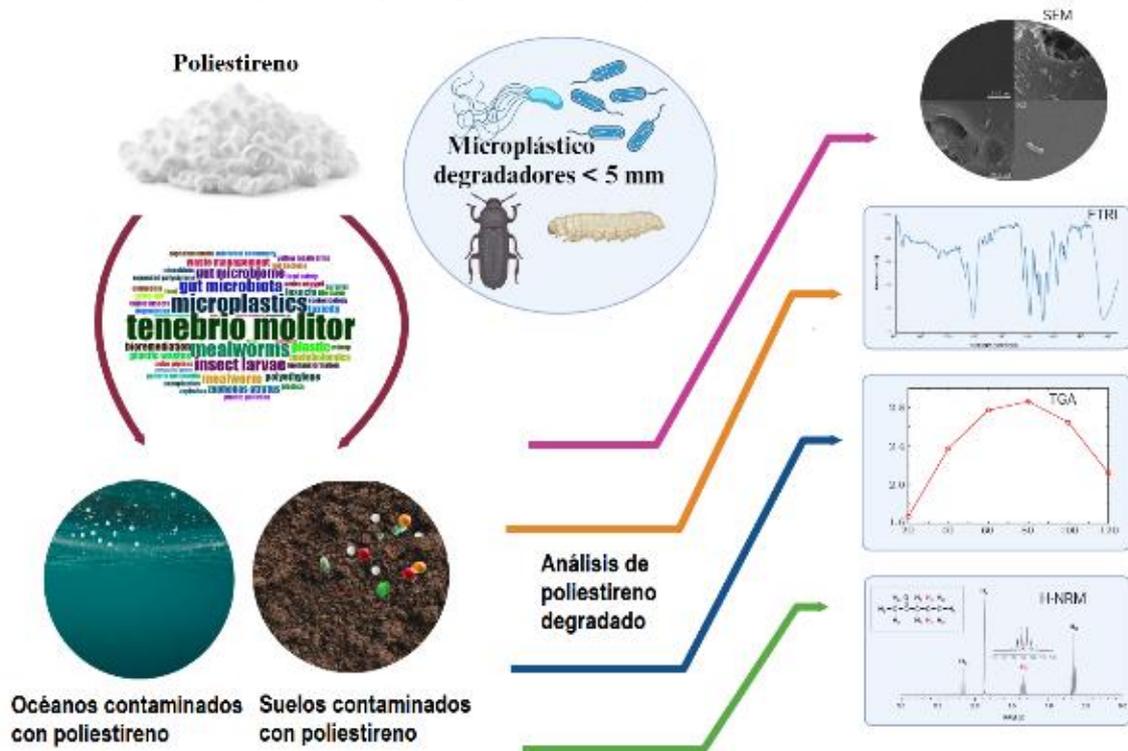


Figura 1. Esquema de la revisión bibliométrica de técnicas de caracterización del poliestireno degradado por biodegradadores.



Figura 4. Palabras clave por autor según WOS.

Fuentes de Publicaciones

Los datos recopilados hasta noviembre de 2023, en cuanto a publicaciones en revistas científicas, indican que la revista Chemosphere ha liderado con 7 artículos, seguida de la revista Environmental Pollution con 6 artículos, según registros de Scopus. Sin embargo, se observa una posición compartida entre las revistas Environmental Pollution y Journal of Hazardous Materials, ambas con 5 artículos, seguida de la revista Chemosphere con 4 artículos. La distribución de artículos entre estas revistas sugiere una mayor concentración en

la revista Chemosphere, seguida por la revista Environmental Pollution, con una participación significativa del Journal of Hazardous Materials. Esta observación podría señalar áreas de especialización de estas revistas en el tema de la degradación del poliestireno y su interés en contribuir a la investigación en este campo. Además, resalta la importancia de considerar estas revistas como fuentes confiables y relevantes para acceder a información clave sobre el tema discutido.

Citas de Publicaciones

Entre las publicaciones más citadas a nivel mundial, en el estudio de la degradación del poliestireno, destacan dos artículos que han tenido un impacto significativo. La publicación de Brandon et al. (Brandon et al., 2021) publicado en la revista Environment Science Technology, ha acumulado un total de 168 citaciones, según Scopus, destacando su gran relevancia en la comunidad científica, como se muestra en la Figura 5. Por otro lado, la publicación de Yang et al. (S.-S. Yang, Wu, et al., 2018) publicado en la revista Chemosphere registró 80 citas en WOS, como se evidencia en la Figura 6, lo que demuestra su importante influencia en esta área de estudio.

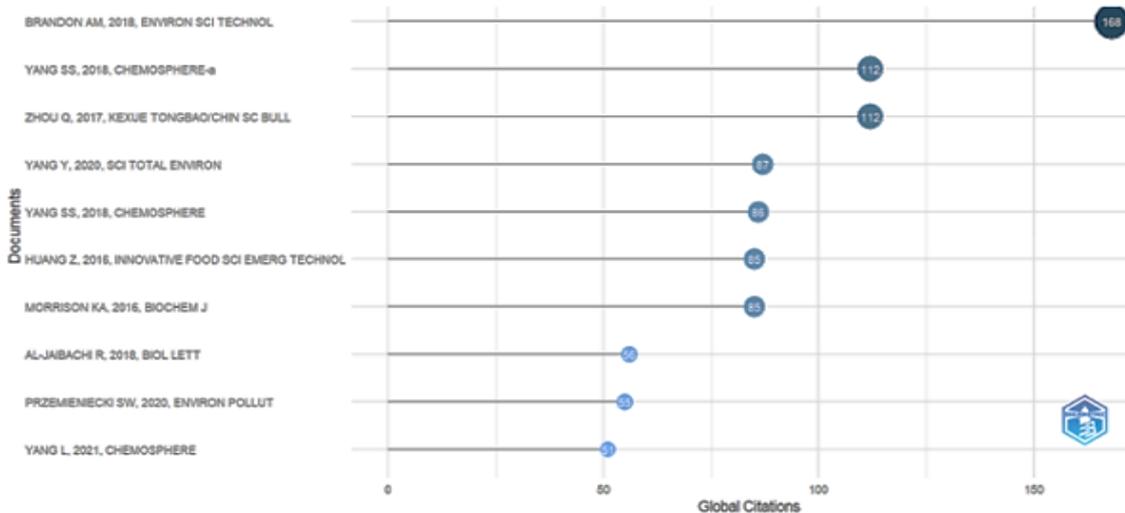


Figura 5. Publicaciones más citadas en relación al autor y la revista sobre la degradación del poliestireno durante 2015 a 2023, según Scopus.

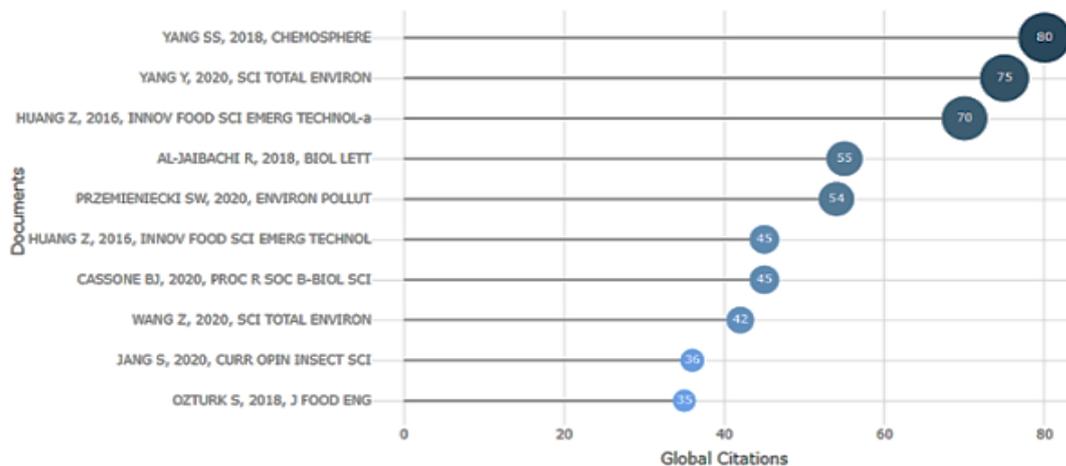


Figura 6. Publicaciones más citadas en relación al autor y la revista sobre la degradación del poliestireno durante 2015 a 2023, según WOS.

Estos resultados resaltan la importancia y reconocimiento de estas publicaciones como obras de referencia, lo que evidencia su impacto en la comunidad científica en el ámbito de la degradación del poliestireno. Además, sugiere que estas publicaciones han sido fundamentales para el desarrollo y avance de este campo de investigación, posiblemente por la profundidad de su contenido, la innovación en sus enfoques o la solidez de sus conclusiones. Estos trabajos servirán de base y guía para futuras investigaciones y análisis de esta área específica, consolidando su relevancia en la literatura científica.

Técnicas de Caracterización

En la detección de la degradación se han utilizado técnicas analíticas de alta complejidad, como la microscopía de barrido electrónico (MBE), la medición del ángulo de contacto con el agua, la cromatografía de permeación en gel (CPG), el análisis termogravimétrico (TGA), la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), la resonancia magnética nuclear de protones (H-NRM) y la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas (GC-MS). Estas técnicas permiten la evaluación de una amplia gama de cambios en el polímero, incluyendo modificaciones en la morfología de la superficie (SEM), alteraciones de las propiedades térmicas (TGA), cambios químicos (FTIR, H-NMR) e identificación y cuantificación de intermedios y productos resultantes de biodegradación (GC-MS). La cuantificación de la degradación del poliestireno implicó el uso de gravimetría para determinar la pérdida de peso específica del polímero causada por el consumo de larvas o microorganismos. Sin embargo, es importante señalar que este valor puede presentar una variabilidad significativa, especialmente al analizar el consumo de microorganismos (Woo et al., 2020). En este contexto, las técnicas analíticas juegan un papel crucial en la verificación de diversas características asociadas a la biodegradación del poliestireno (Wang et al., 2024; Yolanda et al., 2024; He et al., 2023; Kim et al., 2020; Kundungal et al., 2021).

Microscopía de Barrido Electrónico

La microscopía de barrido electrónico (MBE) es una técnica utilizada para la identificación de la biodegradación del poliestireno (Yolanda et al., 2024; Kim et al., 2020; Tang et al., 2017; Z. Wang et al., 2020). Esta técnica desempeña un papel fundamental en la detección de alteraciones en la integridad física y los cambios superficiales del poliestireno como resultado de la colonización y actividad bacteriana (Z. Wang et al., 2020). Durante un período de 28 días (Y. Yang et al., 2015b) a 30 días (Z. Wang et al., 2020), la observación inicial reveló la proliferación de microorganismos, la adherencia a la superficie del polímero y la formación de biopelículas microbianas. Cuando se eliminan estas biopelículas se observa una superficie rugosa a diferencia del control, que permanece lisa y sin alteraciones. Además, presentan agujeros y cavidades en la superficie (Z. Wang et al., 2020). Se han encontrado biopelículas

en las cavidades de algunos microorganismos (Woo et al., 2020).

En el caso de las larvas de *T. molitor* alimentadas con poliestireno, se observaron fragmentos de poliestireno adheridos estáticamente a las excretas, pero no como parte integral de la masa fecal (Marmanillo et al., 2021). En las excretas de las larvas de *P. davidis* se han identificado fragmentos de poliestireno que muestran cavidades internas y biopelículas, que generan una morfología prominente diferente al control (Woo et al., 2020). En la Tabla 1 se presentan los principales cambios morfológicos ocurridos en la degradación del poliestireno.

Tabla 1

Modificaciones morfológicas en el poliestireno residual observadas con MBE

Muestra	Características	Referencia
Cultivos de <i>Enterobacter hormaechei</i>	Biopelícula en la periferia y cavidades en la superficie	(Kang et al., 2023)
Cultivos líquidos de <i>Klebsiella</i> , <i>Pseudomonas</i> y <i>Stenotrophomonas</i>	Estructuras fibrilares delgadas enlazadas a las células bacterianas con la superficie abiótica	(Cucini et al., 2022)
Cultivos de <i>Massilia</i> sp.	Biopelícula y agujeros en la película	(X. Jiang et al., 2019)
Cultivos de <i>Pseudomonas</i> sp.	Borde liso y agujeros en la superficie	(Kim et al., 2020)
Cultivos de <i>B. megaterium</i>	Colonias de bacterias adheridas a la superficie formando una biopelícula. Grietas en la superficie	(Meng et al., 2021)
Larva del intestino medio de <i>G. mellonella</i>	El número de microperlas en el intestino de las larvas disminuye durante la digestión	(S. Wang et al., 2022)
Cultivos de <i>Acinetobacter</i> sp.	Biopelículas y células bacterianas agrupadas y adheridas a la superficie del poliestireno	(Z. Wang et al., 2020)
Excreta de <i>P. davidis</i>	Cavidades y biopelículas	(Woo et al., 2020)
Cultivos de <i>Exiguobacterium</i> sp.	Deterioro de la superficie con formación de agujeros y cavidades en la superficie	(Y. Yang et al., 2015b)

Ángulo de Contacto con el Agua

El análisis del ángulo de contacto con el agua se utiliza para evaluar los cambios en la hidrofobicidad del poliestireno por acción de la actividad microbiana. La reducción del contacto entre las gotas de agua y la superficie del poliestireno indica una disminución en la tensión superficial del agua, lo cual se debe a las interacciones polares más intensas. Este es el resultado de la introducción de oxígeno a la superficie del poliestireno durante el proceso oxidativo (Kim et al., 2020). La oxidación convierte regiones previamente hidrofóbicas en hidrofílicas, cambia las propiedades químicas de la superficie

del polímero, disminuye la resistencia a la degradación microbiana y, por lo tanto, promueve la biodegradación (Yang et al., 2015a). Además, indica los cambios significativos en las propiedades químicas de la superficie del poliestireno, con reducciones que oscilaron entre el 13% y 31% (Kim et al., 2020).

Se observaron también cambios tanto en el polímero incubado con microorganismos como en el polímero residual presente en las excretas de larvas de *P. davidis* alimentadas con el polímero durante 20 días. Se notó una reducción del ángulo de contacto con el agua, del 80% (Woo et al., 2020). Se observó también una disminución del 13,29% en poliestireno después de 60 días de incubación con *Pseudomonas sp.* (Kim et al., 2020) y 31,16% con *Messilia sp.*, después de 30 días de incubación (Jiang et al., 2019). Es importante destacar que la disminución del ángulo de contacto con el agua no siempre está directamente relacionada con el tiempo de incubación, sino que depende de las características de los microorganismos utilizados, las condiciones experimentales y la naturaleza del poliestireno.

Cromatografía de Permeación en Gel

La cromatografía de permeación en gel (CPG) es una técnica esencial para demostrar las variaciones en el peso molecular (PM), el peso numérico promedio (PNP) y la distribución del peso molecular del polímero residual. Estas variaciones se detallan en la Tabla 2.

Las diversas variaciones del peso molecular se realiza con la técnica de CPG tanto en los excrementos de larvas que se alimentan de poliestireno como en el cultivo de bacterias aisladas de estas larvas (Z. Wang et al., 2020; S.-S. Yang, Brandon, et al., 2018; S.-S. Yang, Wu, et al., 2018). Los microorganismos desempeñan un papel importante en el proceso al adherirse y colonizar el poliestireno. Esta acción conduce a una disminución de la hidrofobicidad del material, favoreciendo así el proceso de degradación. La biodegradación del poliestireno se inicia con el proceso de despolimerización o rotura de la cadena debido que las moléculas de poliestireno son demasiado grandes para sufrir una biodegradación directa (Jiang et al., 2021).

Un indicador importante de la modificación, despolimerización y degradación del poliestireno es la disminución del peso molecular y el peso numérico promedio. Se evidencia la rotura de cadenas de poliestireno, a través de la acción de las enzimas de los insectos o por el ataque de

microorganismos. Este proceso ocurre en los intestinos de las larvas de insectos degradantes (Jiang et al., 2021). Durante el análisis de los fragmentos de poliestireno encontrados en las excretas de las larvas de *G. mellonella*, se observó un aumento de 11,20% en el peso numérico promedio, lo que sugiere un consumo parcial de poliestireno por parte de las larvas (Lou et al., 2020).

El proceso de despolimerización varía en función de las características de los microorganismos y de las condiciones del proceso experimental. Este proceso fue más significativo en *T. obscurus* que en *T. molitor* (Peng et al., 2019). La disminución del peso numérico promedio y el peso molecular del poliestireno en presencia de la bacteria *Acinetobacter sp.* ocurrió a los 60 días de digestión (Wang et al., 2020), y de 14 a 32 días con las larvas de insectos (Woo et al., 2020; Yang et al., 2018; Yang, Wu, et al., 2018).

Se observó que el peso molecular y el peso numérico promedio del poliestireno residual presente en las excretas de las larvas *Z. atratus* disminuyeron en un 39 % y 45 %, respectivamente (Peng et al., 2020). Este fenómeno ocurre debido que el poliestireno que tiene un peso molecular inferior a 90 000 Da se despolimeriza más rápido que aquellos que tienen un peso molecular superior a 120 000 Da, por lo que la despolimerización es más lenta o simplemente no ocurre (Peng et al., 2020). Se ha reportado disminución en el peso molecular y en el peso numérico promedio, así como un cambio negativo en la distribución del peso molecular, debido a la biodegradación que ocurre en las cadenas de polímeros de diferentes tamaños (Woo et al., 2020).

Termogravimetría

La termogravimetría (TGA) se utiliza para detectar los cambios térmicos en el polímero residual presente en las excretas (Peng et al., 2020) o en cultivos de bacterias aisladas del intestino de las larvas (Kim et al., 2020). Este análisis caracteriza las variaciones térmicas del poliestireno antes y después del tránsito a través del intestino de los insectos degradadores. El programa de calentamiento implica una atmósfera de nitrógeno y de aire ambiental, para estudiar la pirólisis del poliestireno (Peng et al., 2020), permitiendo comparar la composición química del sustrato a través de los componentes liberados durante la pirólisis.

Tabla 2

Variaciones en el PM y PNP determinados por CPG en los residuos de poliestireno (PS)

Excreta	PM (Da)		PNP (Da)		Referencia
	Control	Residuos de PS	Control	Residuos de PS	
<i>Z. atratus</i>	144400	106381	64000	42304	(Jiang et al., 2021)
<i>G. mellonella</i>	144400	136735	64000	57458	
<i>T. molitor</i>	144400	127793	64000	54472	
<i>Z. atratus</i>	210400	128344	58500	32175	(Peng et al., 2020)
<i>T. obscurus</i>	345000	140760	107000	79180	(Peng et al., 2019)
<i>T. molitor</i>	345000	242190	107000	94481	
<i>P. davidis</i>	152339	147254	80515	77161	(Woo et al., 2020)
<i>T. molitor</i>	228000	203376	90000	75960	(Yang, Wu, et al., 2018)
<i>Z. atratus</i>	274000	134000	147000	66000	(Yang et al., 2020)

La disminución gradual de la masa a temperaturas elevadas que van de 0 a 800 °C sugiere una presencia mínima de poliestireno o su degradación, con la posible formación de otros compuestos en el intestino de las larvas. En el grupo de control se observó una pérdida de peso alrededor del 95% a 380 y 440 °C (Jiang et al., 2021). En cambio, en las excretas de las larvas se identificaron tres y cuatro tasas de descomposición con máximos del 35% a 41% en peso a la temperatura de 360 y 480 °C, respectivamente (Peng et al., 2019).

Se identificó que el poliestireno residual presente en las excretas de larvas de *Uloma* sp., se descompone a temperaturas de 68,62; 354,85 y 409,40 °C (Kundungal et al., 2021). Estas variaciones en las temperaturas de descomposición evidencian la presencia de otros compuestos formados cuando el polímero atravesó el intestino de las larvas. En el poliestireno del grupo de control, se registró una pérdida de peso del 85 % en el rango de 370 a 430 °C, con la máxima descomposición a 405 °C (Lou et al., 2020).

También, se observó que la tasa de pérdida de peso en el poliestireno fue de 98,45% en el rango de 350 a 470 °C para el grupo de control, 56,78% en el poliestireno ingerido por las larvas de *Uloma* sp. y 44,78% en una dieta mixta de poliestireno con afrecho (Kundungal et al., 2021).

Durante el análisis termogravimétrico han identificado cuatro picos de máxima descomposición a las temperaturas de 68, 251, 325 y 378 °C en el poliestireno de las excretas de *T. molitor* y dos picos a 88,32 y 383 °C en el poliestireno de las excretas de larvas de *Z. atratus* (Kim et al., 2020). Por otro lado, han identificado cinco picos de máxima descomposición a las temperaturas de 78,7; 246; 354; 448 y 509 °C en el poliestireno residual de las excretas de larvas de *Z. atratus* (Peng et al., 2020). La variación en el número de picos correspondientes a la máxima descomposición evidencia diferencias significativas, y la aparición de un nuevo pico indica la formación de una sustancia orgánica con propiedades térmicas diferentes (Kim et al., 2020; Peng et al., 2020). Por otro lado, se observó una pérdida de peso del 35,15% en el poliestireno de las excretas de *T. obscurus* y del

41,03% en el poliestireno de las excretas de *T. molitor* (Peng et al., 2019).

También, se identificó una pérdida de peso del 36% a las temperaturas de 120 y 395 °C y del 27% a 400 y 480 °C en el poliestireno de las excretas de *Z. atratus*, con una pérdida del 39% a las temperaturas de 121 y 380 °C y del 33% a 400 °C y 480 °C en el poliestireno de las excretas de *T. molitor* (S. Jiang et al., 2021). El poliestireno degradado por la bacteria *Acinetobacter* sp., aislada previamente de *T. castaneum*, se obtiene una reducción en la estabilidad térmica, con temperaturas de 247,3 °C (reacción inicial), 364,6 °C (primer pico) y 393,4 °C (temperatura final), en comparación con las temperaturas de 262,1; 446,7 y 411,2 °C, respectivamente observados en el grupo control (Kim et al., 2020). Los cambios en la temperatura de degradación se atribuyen a la ruptura y despolimerización de las cadenas largas del poliestireno (Wang et al., 2020). Esto destaca la complejidad y la diversidad del proceso de degradación del poliestireno en el tracto digestivo de distintas especies de larvas, lo que resulta en la formación de compuestos con propiedades térmicas únicas.

Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica utilizada para identificar y diferenciar los cambios entre el poliestireno original y los residuos encontrados en las excretas de larvas de insectos degradadores de poliestireno (Kundungal et al., 2021). Además, se emplean para el estudio de bacterias aisladas del intestino larvario que poseen la capacidad de degradar este polímero (Kim et al., 2020; Wang et al., 2020). Se identifican diversos picos relacionados con grupos como carbonilo ($\text{H}_2\text{C}=\text{O}$), hidroxilo (-OH) y enlaces alqueno, $\text{CH}=\text{CH}$ (Peng et al., 2020), como se detalla en la Tabla 3.

Los espectros de absorbancia generalmente se encuentran en el rango de 4000 – 5000 cm^{-1} (Brandon et al., 2021) o de 4000 – 400 cm^{-1} (Kundungal et al., 2021), para la caracterización de los grupos funcionales y modificaciones en la estructura química del poliestireno (Yang, Wu, et al., 2018).

Tabla 3

Modificaciones en la estructura química del poliestireno residual determinadas por FTIR

Muestra	tiempo ¹	Picos, cm^{-1}	Grupos funcionales	Referencia
Alimento de <i>G. mellonella</i>	14	Algún pico en el espectro: 1750–1600	HC=O	(Billen et al., 2020)
Enriquecimiento microbiano	90	3000–3500; 1000–1300; 700–750	R-OH, C-O, C-H	(Brandon et al., 2021)
Excreta de <i>Z. atratus</i>	60	3300–3600; 1700	O-H, C=O	(Kim et al., 2020)
Excreta de <i>Uloma</i> sp.	28	1075–1150; 1650, 1700; 1550–1610; 1800–200	C-O, C=C, C=O, C=O	(Kundungal et al., 2021)
Cultivos de <i>Pantoea</i> sp., <i>Klebsiella</i> sp.	6	3000–3100, 2800–3000, 1654, 1494, 1453	C-H, C-H C=O, C=O, C=O	(Lin & Liu, 2020)
Excreta de <i>G. mellonella</i>	21	1700; 1050–1150; 2500–3500	C=O, C-O, carboxylic acid groups	(Lou et al., 2020)
Excreta de <i>T. molitor</i>	7	1700 y 1050–1150	C=O, C-O	(Lou et al., 2021)
Excreta de <i>Z. atratus</i>	33	1075–1150, 1700, 3440	C-O, C=O R-OH	(Peng et al., 2020)
Excreta de <i>P. davidis</i>	20	1670 y 3285	C=O, R-OH	(Woo et al., 2020)
Excreta de <i>T. molitor</i>	60	1550–1610, 1800–2000, 1700	C=C, C=C, C=O	(Yang et al., 2021)
Cultivos de <i>T. molitor</i>	32	1550–1610; 1800–2000; 1500–3500	C=O, C=O R-OH	(Yang, Brandon, et al., 2018)

¹ días de alimentación de larvas o incubación de bacterias con poliestireno.

La presencia de nuevos picos se asocia con la incorporación del oxígeno, la rotura de los anillos bencénicos y la formación de grupos funcionales durante el paso del polímero a través del intestino de las larvas, lo que demuestra el proceso oxidativo y la despolimerización (Peng et al., 2020). Estos cambios se reflejan en los picos identificados entre 1000–1300 cm^{-1} (C-O), 1555–2000 cm^{-1} (C=O), 2800–3000 cm^{-1} (C-H), 3000–3500 cm^{-1} (R-OH) y 1650 cm^{-1} (C=C) (Lou et al., 2020).

Los cambios en los enlaces químicos del poliestireno residual en las excretas de larvas de *Uloma* sp. (Kundungal et al., 2021), *Z. atratus* (Peng et al., 2020), *G. mellonella* (Lou et al., 2020) y *T. molitor* (Jiang et al., 2021), que implican la incorporación de oxígeno a la cadena de carbonos, están asociados con el proceso de degradación y despolimerización. Estos cambios que ocurren son resultado de la irradiación, el envejecimiento y la biotransformación (Kundungal et al., 2021).

En el poliestireno residual presente en las excretas se encontraron nuevos grupos con picos en 1075–1150 cm^{-1} (C-O), 1650–1700 cm^{-1} (C=O) y 3450 cm^{-1} (asociados a grupos hidroxílicos y carboxílicos R-OH). Los picos observados en 2500–3500 cm^{-1} se atribuyeron a enlaces de hidrógeno de grupos hidrofóbicos y ácidos carboxílicos, produciendo cambios en las propiedades del polímero de hidrofóbico a hidrofílico en su superficie (Yang Brandon, et al., 2018). Además, los picos identificados en el rango de 1550–1610 cm^{-1} y 1800–2000 cm^{-1} , ambos asociados con enlaces C=C, están relacionados con la disminución en el número de anillos que previamente se rompieron. Esta reducción resulta en una disminución del contenido polimérico en las excretas y, como consecuencia, se observa una disminución de los picos en el rango de 625–970 cm^{-1} (Jiang et al., 2021; Lou et al., 2020; Peng et al., 2020). El análisis FTIR del cultivo de poliestireno residual con bacterias aisladas de *Z. morio* y *T. molitor*, se identificó picos a 3400 cm^{-1} , 1044 cm^{-1} , 944 cm^{-1} , 926 cm^{-1} y 856 cm^{-1} a las 0 h, los cuales son consistente con la presencia de glicerol utilizado para preservar las bacterias. Después de 6 días, se detectaron picos asociados a enlaces aromáticos (C=C) y anillos alifáticos (C-H), atribuidos a la biodegradación del poliestireno (Lin & Liu, 2020).

Resonancia Magnética Nuclear

El análisis de resonancia magnética nuclear (H-NMR) se emplea para identificar alteraciones en los grupos terminales del poliestireno, resaltando las modificaciones en su estructura química. La presencia de nuevos picos en el espectro indica la transformación gradual del poliestireno. Al analizar el poliestireno presente en las excretas de larvas de *T. molitor* mediante H-NMR, se detectaron picos en el rango de 6,46 a 7,09 ppm, asociados a la región aromática del poliestireno, estos disminuyeron en las excretas de larvas alimentadas con poliestireno y salvado. También se detectó un pico en 1,6 ppm debido a la inclusión de los grupos carboxilo (C=O) en el polímero (Kundungal et al., 2021). Por otro lado, en las excretas de las larvas de *Z. atratus*, se identificaron picos a 5,3 y 2,3 ppm,

correspondientes a enlaces alquenos y grupos hidroxilo (R-OH), respectivamente (Peng et al., 2020). Los análisis de H-NMR y FTIR verifican la despolimerización del poliestireno, la oxidación de largas cadenas de hidrocarburos y la ruptura de anillos bencénicos. Este análisis combinado de H-NMR y FTIR corrobora la modificación del poliestireno como resultado de la degradación y la incorporación de oxígeno, evidenciada por los picos asociados con los grupos carbonilo e hidroxilo. Además, se identifican nuevas selecciones relacionadas con cambios químicos en los grupos carbonilo (CH₂=CO) e hidroxilo (-OH). La presencia de estos grupos en el polímero residual de las excretas, pero no en el poliestireno original, indica la transformación y modificación del poliestireno en el intestino de las larvas. Se ha sugerido que la degradación del poliestireno por la enzima secretada por *pseudomonas* sp. inicia con la inserción de oxígeno en los enlaces C-H, formando alcoholes (C-OH), seguido de la oxidación del carbonilo (-C=O) y, finalmente, la fragmentación en moléculas más pequeñas mediante hidrólisis enzimática (Kim et al., 2020).

Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas

El análisis de los intestinos y excrementos de larvas de *G. mellonella*, *Z. atratus* y *T. molitor* por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas reveló una diversidad de ácidos y alcoholes, como el ácido 2-propenoico, el alcohol behénico, el ácido ftálico y largas cadenas de ácidos grasos como el ácido oleico, hexadecanoico y octadecanoico. Además, se ha detectado ácido hexadecanoico en el intestino de las tres especies y sólo ácido 2-propanoico en las excretas. Estos resultados mostraron similitudes en la fisiología y capacidad de ruptura de enlaces del poliestireno entre los microorganismos de las tres especies. En el poliestireno control se detectaron componentes tóxicos como fenol y tolueno, utilizados como plastificantes y aditivos, los cuales no se encontraron en las excretas intestinales, lo que sugiere su metabolización por larvas (Jiang et al., 2021). Además, se observó en las excretas una disminución de los compuestos más complejos presentes en el poliestireno, como el anillo bencénico del ftalato y el ácido ftálico (Lou et al., 2020).

La formación de largas cadenas de ácidos grasos como el ácido oleico, octadecanoico y hexadecanoico, junto con la reducción de las cadenas de ésteres de ácido carboxílico con radical hidroxilo o anillos de benceno, indican la digestión y biodegradación del poliestireno (Lou et al., 2020). Los ácidos grasos y los ésteres carboxílicos son los principales mediadores durante este proceso (S. Jiang et al., 2021). En el intestino de las larvas de *T. molitor* alimentadas con poliestireno, se encontraron diversos compuestos, incluyen monómeros como estireno y alfa-metilestireno, oligómeros como 2,4,6-trifenil-1-hexano y 1,3,5-trifenilciclohexano. También se han encontrado componentes bioactivos como ácidos grasos saturados (mirístico o palmítico), ésteres de ácidos grasos y sus respectivas amidas (Tsochatzis et al., 2021).

CONCLUSIONES

El análisis de la degradación del poliestireno por insectos y microorganismos asociados durante el periodo 2015-2023 ha evidenciado la eficacia de las técnicas de caracterización para discernir los cambios significativos en la morfología de la superficie, alteraciones de las propiedades térmicas, cambios químicos e identificación y cuantificación de intermedios y productos resultantes de la biodegradación del poliestireno. Se han observado diversas alteraciones en la morfología de la superficie del poliestireno, como la formación de biopelículas, rugosidades, agujeros y cavidades. Además, se ha constatado una reducción tanto en el peso molecular como en el peso numérico promedio, acompañada de una disminución en el ángulo de contacto con el agua. También se han registrado variaciones térmicas, así como modificaciones en los grupos funcionales y

terminales del polímero. Las características del poliestireno residual derivado de cultivos con microorganismos o de la dieta ingerida por insectos brindan evidencia directa de la degradación. Del mismo modo, las características del poliestireno residual encontrado en las excretas de larvas consumidoras de poliestireno, así como en el intestino y las excretas, junto con los cambios observados en las larvas o en los microorganismos alimentados con poliestireno, constituyen evidencia indirecta de biodegradación. Estos resultados subrayan la complejidad y diversidad de los procesos implicados en la degradación del poliestireno por insectos y microorganismos. Asimismo, resaltan la importancia de considerar múltiples indicadores y características para comprender completamente el proceso de biodegradación del poliestireno y sus implicaciones ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amato-Lourenço, L. F., dos Santos Galvão, L., de Weger, L. A., Hiemstra, P. S., Vijver, M. G., & Mauad, T. (2020). An emerging class of air pollutants: Potential effects of microplastics to respiratory human health? *The Science of the Total Environment*, *749*, 141676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141676>
- Billen, P., Khalifa, L., Van Gerven, F., Tavernier, S., & Spataro, 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139521>
- Brandon, A. M., Garcia, A. M., Khlystov, N. A., Wu, W.-M., & Criddle, C. S. (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>
- Castañeta, G., Gutiérrez, A. F., Nacaratte, F., & Manzano, C. A. (2020). Microplásticos: Un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *Revista Boliviana de Química*, *37*(3), 142-157.
- Cucini, C., Funari, R., Mercati, D., Nardi, F., Carapelli, A., & Marri, L. (2022). Polystyrene shaping effect on the enriched bacterial community from the plastic-eating *Alphitobius diaperinus* (Insecta: Coleoptera). *Symbiosis*, *86*(3), 305-313. <https://doi.org/10.1007/s13199-022-00847-y>
- Dioses-Salinas, D. C., Pizarro-Ortega, C. I., & De-la-Torre, G. E. (2020). A methodological approach of the current literature on microplastic contamination in terrestrial environments: Current knowledge and baseline considerations. *Science of The Total Environment*, *730*, 139164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139164>
- Fu, C., Muhammad, A., Noreen, K., Atia, N., Kashif, I., Usman, A., Mohammed, A., Jung, M., & Ali, N. (2023). Interactive effects of polystyrene microplastics and Pb on growth and phytochemicals in mung bean (*Vigna radiata* L.). *Journal of Hazardous Materials*, *449*, 130966. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130966>
- Guangorena, G., & Kobayashi, T. (2024). Properties of chitin and its regenerated hydrogels from the insect *Zophobas morio* fed citrus biomass or polystyrene. *Gels*, *10*(7), 433. <https://doi.org/10.3390/gels10070433>
- He, L., Yang, S., Ding, J., Li, Z., Pang, J., Xing, D., Zhao, L., Zheng, H., Ren, N., & Wu, W. (2023). Responses of gut microbiomes to commercial polyester polymer biodegradation in *Tenebrio molitor* Larvae. *Journal of Hazardous Materials*, *457*, 131759. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131759>
- Hwang, J., Choi, D., Han, S., Jung, S. Y., Choi, J., & Hong, J. (2020). Potential toxicity of polystyrene microplastic particles. *Scientific Reports*, *10*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64464-9>
- Iswahyudi, I., Wahyu, V., Guau, G., Adi, S., Garfansa, M., Mujiyanti, W., & Sholeh, M. (2024). Investigating the impact of microplastics type of polyethylene, polypropylene, and polystyrene on seed germination and early growth of rice plants. *Environmental Quality Management*, *34*(1). <https://doi.org/10.1002/tqem.22287>
- Jiang, S., Su, T., Zhao, J., & Wang, Z. (2021). Biodegradation of Polystyrene by *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella*, and *Zophobas atratus* Larvae and Comparison of Their Degradation Effects. *Polymers*, *13*(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/polym13203539>
- Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M., & Klobočar, 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>
- Kang, M., Kwak, M., & Kim, Y. (2023). Polystyrene microplastics biodegradation by gut bacterial *Enterobacter hormaechei* from mealworms under anaerobic conditions: Anaerobic oxidation and depolymerization. *Journal of Hazardous Materials*, *5*(459), 132045. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132045>
- Kim, H. R., Lee, H. M., Yu, H. C., Jeon, E., Lee, S., Li, J., & Kim, D.-H. (2020). Biodegradation of Polystyrene by *Pseudomonas* sp. Isolated from the Gut of Superworms (Larvae of *Zophobas atratus*). *Environmental Science & Technology*, *54*(11), 6987-6996. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01495>
- Kundungal, H., Synshiang, K., & Devipriya, S. P. (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*, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100083>
- Lee, H. M., Kim, H. R., Jeon, E., Yu, H. C., Lee, S., Li, J., & Kim, D.-H. (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), 1341. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8091341>
- Lin, H.-H., & Liu, H.-H. (2020). FTIR Analysis of Biodegradation of Polystyrene by Intestinal Bacteria Isolated from *Zophobas morio* and *Tenebrio Molitor*. *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, *17*. <https://doi.org/10.46604/peti.2021.5450>
- Lixia, D., Shunyan, C., Jiaying, L., Jiawei, C., Fengyuan, C., Xiaodong, Z., Hongbin, L. (2024). Nanoplastics impair growth and nitrogen fixation of marine nitrogen-fixing cyanobacteria. *Environmental Pollution*, *350*, 123960. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123960>
- López Aguirre, J. F., Pomaquero Yuquilema, J. C., & López Salazar, J. L. (2020). Análisis de la contaminación ambiental por plásticos en la ciudad de Riobamba. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, *5*(12), 725-742.
- Lou, Y., Ekaterina, P., Yang, S.-S., Lu, B., Liu, B., Ren, N., Corvini, P. F.-X., & 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(5), 2821-2831. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07044>
- Lou, Y., Li, Y., Lu, B., Liu, Q., Yang, S.-S., Liu, B., Ren, N., Wu, W.-M., & 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, 126222. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126222>
- Lu, B., Lou, Y., Wang, J., Liu, Q., Yang, S., Ren, N., Wu, W., & Xing, D. (2024). Understanding the Ecological Robustness and adaptability of the gut microbiome in plastic-degrading superworms (*Zophobas atratus*) in response to microplastic and antibiotics. *Bioremediation and Biotechnology*, 58(27), 12028-12041. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c01692>
- Lv, S., Wang, Q., Li, Y., Li, G., Hu, R., Chen, Z., & Shao, Z. (2024). Biodegradation of polystyrene (PS) and polypropylene (PP) by deep-sea psychrophilic bacteria of *Pseudoalteromonas* in accompany with simultaneous release of microplastics and nanoplastics. *Science of the Total Environment*, 948, 174857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174857>
- Machona, O., Chidzondo, F., & Mangoyi, R. (2022). *Tenebrio molitor*: Possible source of polystyrene-degrading bacteria. *BMC Biotechnology*, 22(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s12896-021-00733-3>
- Marmanillo, V. I. V., Farfán, B. C., Camino, K. L. S., Llasa, G. J. S., & Nina, B. A. H. (2021). 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), 11169-11185. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.1160
- Massuga, F., Larson, M. A., Kuasoski, M., & Doliveira, S. L. D. (2022). Plastic Waste and Sustainability: Reflections and Impacts of the Covid-19 Pandemic in the Socio-Cultural and Environmental Context. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 16(1), Article 1. <https://doi.org/10.24857/rags.v16.2860>
- Meng, T. K., Kassim, A. S. B. M., Razak, A. H. B. A., & Fauzi, N. A. B. M. (2021). *Bacillus megaterium*: A Potential and an Efficient Bio-Degrader of Polystyrene. *Braz. Arch. Biol. Technol*, e21190321-e21190321.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lahu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Palmer, K. J., Lauder, K., Christopher, K., Guerra, F., Welch, R., & Bertuccio, A. J. (2022). Biodegradation of Expanded Polystyrene by Larval and Adult Stages of *Tenebrio molitor* with Varying Substrates and Beddings. *Environmental Processes*, 9(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00556-6>
- Pham, T., Longing, S., & Siebecker, M. (2023). Consumption and degradation of different consumer plastics by mealworms (*Tenebrio molitor*): Effects of plastic type, time, and mealworm origin. *Journal of Cleaner Production*, 403, 136842. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136842>
- Peng, B.-Y., Li, Y., Fan, R., Chen, Z., Chen, J., Brandon, A. M., Criddle, C. S., Zhang, Y., & Wu, W.-M. (2020). Biodegradation of low-density polyethylene and polystyrene in superworms, larvae of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad and limited extent depolymerization. *Environmental Pollution*, 266, 115206. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115206>
- Peng, B.-Y., Su, Y., Chen, Z., Chen, J., Zhou, X., Benbow, M. E., Criddle, C. S., Wu, W.-M., & 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>
- Rana, R., Akram, H., Shirin, S., Biplob, D., Ahmad, M., & Tanwne, S. (2024). Microplastics increase cadmium absorption and impair nutrient uptake and growth in red amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) in the presence of cadmium and biochar. *BMC Plant Biology*, 24, 608. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05312-0>
- Rosenboom, J.-G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- Shubham, V., O'Connor, O., Gora, A., Rehman, S., Kiron, V., Siriappagoudar, P., Dahle, D., Kógel, T., Ornsrud, R., & Olsvik, P. (2024). Mixture toxicity of 6PPD-quinone and polystyrene nanoplastics in zebrafish. *Environmental Pollution*, 348, 123835. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123835>
- Sufang, Z., Renju, L., Shiwei, L., Benjuan, Z., Juan, W., & Zongze, S. (2024). Polystyrene-degrading bacteria in the gut microbiome of marine benthic polychaetes support enhanced digestion of plastic fragments. *Communications Earth and Environment*, 5(162). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01318-6>
- Tang, Z.-L., Kuo, T.-A., & Liu, H.-H. (2017). The Study of the Microbes Degraded Polystyrene. *Advances in Technology Innovation*, 2(1), Article 1.
- Tsochatzis, E., Berggreen, I. E., Tedeschi, F., Ntrallou, K., Gika, H., & Corredig, M. (2021). Gut Microbiome and Degradation Product Formation during Biodegradation of Expanded Polystyrene by Mealworm Larvae under Different Feeding Strategies. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(24), 7568. <https://doi.org/10.3390/molecules26247568>
- Urbanek, A. K., Rybak, J., Wróbel, M., Leluk, K., & Mirończuk, A. M. (2020). A comprehensive assessment of microbiome diversity in *Tenebrio molitor* fed with polystyrene waste. *Environmental Pollution*, 262, 114281. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114281>
- Ventura, E., Goncalves, J., Vilke, J., de Errico, G., Benedetti, M., Regolio, F., & Bebianno, M. (2024). Are mixtures of micro/nanoplastics more toxic than individual micro or nanoplastic contamination in the clam *Ruditapes decussatus*? *Marine Pollution Bulletin*, 206, 116697. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116697>
- Wang, Q., Chen, H., Gu, W., Wang, S., & Li, Y. (2024). Biodegradation of aged polyethylene (PE) and polystyrene (PS) microplastics by yellow mealworms (*Tenebrio molitor* larvae). *Science of The Total Environment*, 927, 172243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172243>
- Wang, S., Shi, W., Huang, Z., Zhou, N., Xie, Y., Tang, Y., Hu, F., Liu, G., & Zheng, H. (2022). 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*, 423, 127213. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127213>
- Wang, S., Yu, H., Li, W., Song, E., Zhao, Z., Xu, J., Gao, S., Wang, D., & Xie, Z. (2024). Biodegradation of four polycyclic plastics in superworms (Larvae of *Zophobas atratus*) and effects on the gut microbiome. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135381. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135381>
- Wang, Z., Xin, X., Shi, X., & Zhang, Y. (2020). A polystyrene-degrading *Acinetobacter* bacterium isolated from the larvae of *Tribolium castaneum*. *The Science of the Total Environment*, 726, 138564. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138564>
- Woo, S., Song, I., & Cha, H. J. (2020). Fast and Facile Biodegradation of Polystyrene by the Gut Microbial Flora of *Plesiophthalmus davidis* Larvae. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(18), e01361-20. <https://doi.org/10.1128/AEM.01361-20>
- Yang, L., Gao, J., Liu, Y., Zhuang, G., Peng, X., Wu, W.-M., & Zhuang, X. (2021). Biodegradation of expanded polystyrene and low-density polyethylene foams in larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad versus limited extent depolymerization and microbe-dependence versus independence. *Chemosphere*, 262, 127818. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127818>
- Yang, S.-S., Brandon, A. M., Andrew Flanagan, J. C., Yang, J., Ning, D., Cai, S.-Y., Fan, H.-Q., Wang, Z.-Y., Ren, J., Benbow, E., Ren, N.-Q., Waymouth, R. M., Zhou, J., Criddle, C. S., & Wu, W.-M. (2018). 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.-S., Wu, W.-M., Brandon, A. M., Fan, H.-Q., Receveur, J. P., Li, Y., Wang, Z.-Y., Fan, R., McClellan, R. L., Gao, S.-H., Ning, D., Phillips, D. H., Peng, B.-Y., Wang, H., Cai, S.-Y., Li, P., Cai, W.-W., Ding, L.-Y., Yang, J., ... Criddle, C. S. (2018). 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., & Xia, M. (2020). Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating superworms *Zophobas atratus*. *Science of The Total Environment*, 708, 135233. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135233>
- Yang, X., Wen, P., Yang, Y., Jia, P., Li, W., & Pei, D. (2023). Plastic biodegradation by in vitro environmental microorganisms and in vivo gut microorganisms of insects. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1001750>

- Yang, Y., Yang, J., Wu, W.-M., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., Yang, R., & 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(20), 12080-12086. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02661>
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W.-M., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., Yang, R., & Jiang, L. (2015b). Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms. *Environmental Science & Technology*, 49(20), 12087-12093. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02663>
- Ying, H., Jiang, S., Zhang, Q., Zhou, W., Liang, J., Xu, Y., & Su, W. (2024). Protective effect of Cordycepin on blood-testis barrier against pre-puberty polystyrene nanoplastics exposure in male rats. *Particle and Fibre Toxicology*, 21 (1): 30. <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00590-w>
- Yolanda, D., Anggiani, M., Agung, M., Anggraeni, S., & Afianti, N. (2024). Polystyrene microplastics degradation by microbial consortium from jakarta bay. *Environmental Quality Management*, 34(1), e22291. <https://doi.org/10.1002/tqem.22291>
- Yoon, J., Kim, B., & Kim, K. (2024). Distribution of microplastics in soil by types of land use in metropolitan area of Seoul. *Applied Biological Chemistry*, 67(15). <https://doi.org/10.1186/s13765-024-00869-8>
- Young, R., Ahmed, K., Court, L., Castro, C., Marcora, A., Bactor, J., Paull, C., Wijffels, G., Rane, R., Edwards, O., Walsh, T., & Pandey, G. (2024). Improved reference quality genome sequence of the plastic-degrading greater wax moth, *Galleria mellonella*. *G3(bethesda)*, 14(6), jkae070. <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkae070>
- Yue, X., Xiu, C., Zhang, M., Hou, W., Chong, Z., Jia, L., Da-Lei, Z., Liao, H., Yan, C., Jian, H., Tao, L., & Li-Ping, Z. (2024). Polystyrene nanoplastics induce apoptosis, autophagy, and steroidogenesis disruption in granulosa cells to reduce oocyte quality and fertility by inhibiting the PI3K/AKT pathway in female mice. *Journal of Nanobiotechnology*, 22(1), 460. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02735-7>
- Zhen, Z., Wenrui, S., Peiwen, Y., Shixiu, W., Liming, C., Zhaowen, C., Liang, L., Faisal, K., Menghong, H., Rong, X., & Youji, W. (2024). Bio-based microplastic polylactic acid exerts the similar toxic effects to traditional petroleum-based microplastic polystyrene in mussels. *Science Total Environmental*, 10, 946, 174386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174386>
- Zhuang, H., Zhenxia, L., Menglin, W., Bo, L., Yiwen, C., & Ziyu, L. (2024). Effects of microplastics and combined pollution of polystyrene and di-n-octyl phthalate on photosynthesis of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Science of the Total Environment*, 947, 174426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174426>