

Recepción: 19.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0003-6859-7587>

<https://orcid.org/0000-0003-4392-7028>

<https://orcid.org/0009-0003-1371-7166>

DEL RESIDUO AL RECURSO: PLÁSTICOS BIODEGRADABLES Y ECONOMÍA CIRCULAR EN PUEBLA

TRANSFORMING WASTE INTO VALUE: BIODEGRADABLE
PLASTICS AND THE CIRCULAR ECONOMY IN PUEBLA

Sandra Leticia Castillejos Mosqueda¹

Jorge Raúl Cerna Cortez²

Adrián Gustavo Badillo Morales³

¹Investigador por México-SECIHTI, Facultad de Ciencias Químicas, BUAP

²Laboratorio de Innovación y Materiales Avanzados-DITCo, BUAP

³Posgrado en Ciencias Químicas, BUAP

Correos:

sandra.castillejos@secihtl.mx

jorge.cerna@correo.buap.mx

bm224470026@alm.buap.mx

Resumen

Los plásticos representan una gran importancia económica a nivel global y, en particular, en el estado de Puebla, donde el sector plástico constituye una parte significativa del PIB manufacturero. Sin embargo, en las últimas décadas su producción y consumo han aumentado de manera tan acelerada que han generado una grave problemática ambiental, debido a su acumulación en ecosistemas terrestres y marinos y la formación de microplásticos, estas diminutas partículas pueden encontrarse en el agua, suelo e incluso comida. Dado que los plásticos son parte importante de la economía y están involucrados en muchos sectores industriales, es imperativo idear alternativas sostenibles para continuar teniendo los mismos productos, pero sin afectar el medio ambiente. Entre las estrategias emergentes se encuentra el uso de biopolímeros integrados dentro de un esquema de economía circular, dentro de estos biopolímeros se encuentran el poli (ácido láctico) (PLA), un material derivado de biomasa con alto potencial para sustituir plásticos convencionales.

Palabras clave: biopolímeros, economía circular, polímeros biodegradables, PLA.

Abstract

Plastics play a crucial economic role worldwide, particularly in the Mexican state of Puebla, where the plastics industry accounts for a significant share of the manufacturing GDP. However, in recent decades, their production and consumption have increased so rapidly that plastic waste has become a serious environmental problem. Its accumulation in terrestrial and marine ecosystems accelerates the formation of microplastics, tiny plastic particles that can be found in water, soil and even food. Because plastics are deeply embedded in the economy and in many industrial sectors, it is essential to develop sustainable alternatives that maintain the benefits of plastic products while reducing their environmental impact. One promising strategy is the use of biopolymers within a circular economy framework, in which materials are designed to be reused, recycled or safely degraded. Among these materials, poly(lactic acid) (PLA)—a polymer derived from biomass—stands out for its high potential to replace conventional plastics in multiple applications.

Keywords: biopolymers, circular economy, biodegradable polymers, PLA.

Introducción

En el siglo XXI, los plásticos se han convertido en componentes fundamentales de la vida moderna, con aplicaciones que abarcan desde la construcción hasta los dispositivos médicos y el embalaje (Jiang et al., 2022). A nivel mundial, de acuerdo con datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), la producción de plásticos se duplicó entre 2000 y 2019, pasando de 234 a 460 millones de toneladas, y se prevé que estas cifras se cuadrupliquen hacia 2040 (Global Plastics Outlook, 2022).

En México, para 2024, la producción de resinas plásticas alcanzó aproximadamente 3,5 millones de toneladas, lo que contribuye con el 3,1 % del producto interno bruto manufacturero y genera más de un millón de empleos, evidenciando la importancia económica de este sector (Gobierno de México, 2025). Específicamente, el estado de Puebla se ubicó dentro de

las cuatro entidades más relevantes del sector plástico nacional, y se proyecta que para 2026 el PIB asociado a esta industria crezca alrededor de 3.6 % (Juan Carlos Natale, 2025).

Sin embargo, este incremento en la producción refleja también un uso descontrolado, que se traduce en problemas medioambientales graves: acumulación de residuos plásticos en medios terrestres y acuáticos (Ghaffari et al., 2025), formación de microplásticos (Sahandi et al., 2026) y emisiones de CO₂ asociadas a su producción (Shen et al., 2025). Un informe de la OCDE estima que para 2060 la cantidad de residuos plásticos se triplicará, y que casi dos tercios de ellos provendrán de productos de corta duración —como bolsas, envoltorios y empaques desechables— con una vida útil de apenas minutos u horas, pero capaces de persistir en el ambiente durante cientos de años (Al Khoeriyah & Sembiring, 2024).

¿Qué son los plásticos?

Los materiales plásticos se derivan de productos del petróleo y entre el 5% y el 8% de la producción mundial de petróleo se consume para producirlos. Los materiales plásticos son técnicamente hablando polímeros, los cuales son sustancias orgánicas compuestas de unidades estructurales que se repiten hasta alcanzar pesos moleculares elevados (Sahai et al., 2025). Principalmente se clasifican, por su comportamiento frente a la temperatura, en termoestables y termoplásticos. Los polímeros termoestables son aquellos que una vez moldeados, no pueden volver a fundirse ni deformarse, se dividen en epoxi, baquelita, poliéster, éster vinílico y urea-formaldehído, por el contrario, los termoplásticos son aquellos que pueden fundirse y moldearse repetidamente mediante el calor, existen seis tipos principales de termoplásticos: cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE) (Ncube et al., 2021)



Figura 1. Ejemplos de polímeros termoplásticos y termoestables. (Adaptación del sitio web: <https://openart.ai/video/i2v/sora-v2>)

Los materiales plásticos tienen numerosas aplicaciones, al ser versátiles, duraderos y ligeros, entre las que se incluyen el embalaje, la construcción, los dispositivos biomédicos, la aviación, los textiles, el mobiliario, la auto-

moción y la industria electrónica (Jiang et al., 2022; Ramli et al., 2024). El principal problema asociado a los plásticos es su elevada estabilidad química y resistencia a los procesos de degradación fisicoquímicos y biológicos. Esta alta estabilidad les permite mantenerse en el medio ambiente durante periodos prolongados, lo que contribuye a su acumulación y potencial impacto ecológico (Mihai et al., 2022).

Por ejemplo, la gestión inadecuada de residuos plásticos y su eliminación incorrecta, como tirarlos a la basura, provocan una acumulación excesiva en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Además, ocasiona que los plásticos se vayan descomponiendo en partículas más pequeñas con el tiempo, mediante los procesos de fotodegradación y fragmentación mecánica, dando como resultado a la formación de microplásticos, los cuales contaminan el suelo, los cuerpos de agua e incluso el aire (Dimassi et al., 2022).

Los microplásticos son partículas con un tamaño alrededor de 5mm, que, debido a sus efectos negativos sobre el medio ambiente, se consideran posibles agentes del cambio climático global. Representan un grave riesgo para

la fauna silvestre por la capacidad de causarles daño o la muerte (Roman et al., 2022). Asimismo, los plásticos actúan como esponjas para otros contaminantes, como lo son los metales pesados y sustancias químicas nocivas que, al ser ingeridos por los animales, se pueden introducir fácilmente en la cadena alimenticia, llegando a los seres humanos y poniendo en riesgo la salud pública (Masud et al., 2023).

Ante esta problemática, el desarrollo de polímeros biobasados y biodegradables ha cobrado relevancia; estos están diseñados a partir de fuentes renovables y con una mayor susceptibilidad a la degradación en condiciones ambientales y controladas. El desarrollo de este tipo de polímeros busca reducir la dependencia de recursos fósiles y reducir los desechos asociados a los plásticos convencionales.

Bioplástico: biobasado vs. biodegradable

Para comprender el alcance de los bioplásticos, es necesario aclarar algunos conceptos fundamentales, como qué se entiende por polímeros biobasados y polímeros biodegradables, así como la relación entre ambos y el impacto positivo que pueden generar sobre el medio ambiente.



Figura 2. Riesgo a la salud por microplásticos, desarrollo de biopolímeros para la protección a la vida. (Adaptación del sitio web: <https://deevidei.ai/es/ai>)

La IUPAC describe el bioplástico como un derivado de la biomasa o de monómeros de origen vegetal que pueden modificarse en alguna etapa durante su procesamiento y cumplen con al menos uno de los siguientes criterios: bio-basado y biodegradable.

El término biobasado se refiere a un polímero compuesto total o parcialmente de biomasa, que incluye cualquier tipo de material orgánico renovable de origen biológico, así como residuos orgánicos. Mientras que el término biodegradable se refiere a la capacidad de



Figura 3. Diferencia entre biopolímeros biobasados y biodegradables. (Adaptación del sitio web: <https://artist.io/text-to-image-ai/creations>)

un material para degradarse en componentes naturales como dióxido de carbono, agua y biomasa debido a la acción de microorganismos (Kushwaha et al., 2024).

El ácido poliláctico (PLA) es un ejemplo de un plástico bio-basado y biodegradable. Es ampliamente utilizado ya que de acuerdo con sus propiedades es uno de los polímeros punta para reemplazar polímeros no biobasados y no biodegradables como por ejemplo el poliestireno (PS) (Castillejos et al., 2018). Se puede obtener mediante fermentación microbiana de

azúcares procedentes de diversos materiales de biomasa agrícola (como maíz, arroz, remolacha azucarera y trigo) o mediante síntesis química (Khosravi et al., 2020). De acuerdo con los datos de Grand View Research se prevé que el mercado del ácido poliláctico en México alcance unos ingresos proyectados de 74.7 millones de dólares estadounidenses para el año 2030. Esperando una tasa de crecimiento anual compuesto del 21.2% para el mercado mexicano del ácido poliláctico entre 2024 y 2030 (Grand View Horizon, 2025).

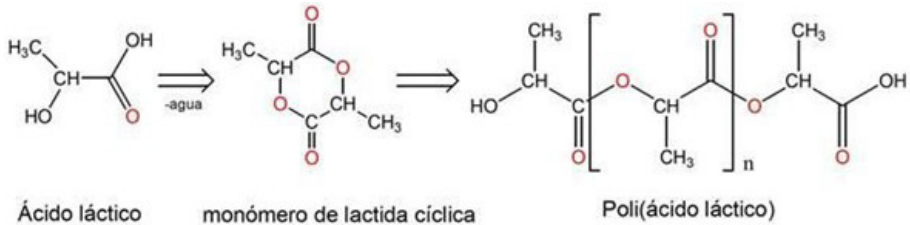


Figura 4. Polimerización de ácido láctico para la obtención de PLA (Autoría propia).

El impulso hacia migrar al uso de bioplásticos se inscribe en el marco más amplio de la economía circular, la cual propone transformar los modelos de producción y consumo mediante la reducción de residuos, el aprovechamiento eficiente de los recursos y la prolongación del ciclo de vida de

los materiales. En este contexto, los polímeros biobasados y biodegradables no solo representan una innovación tecnológica, sino también una herramienta clave para avanzar hacia sistemas productivos más sostenibles y compatibles con los desafíos ambientales actuales.

Economía circular

Definida como el modelo de producción y consumo, esquema bajo el que se opera, en la actualidad, el uso de materiales se le conoce como economía lineal, este modelo opera a través de los principios de extraer, fabricar y desechar, en donde se extraen materiales para transformarlos en productos, después los productos son consumidos o usados una sola vez y posteriormente son descartados como desecho. Sin embargo, este esquema está siendo obsoleto ante los retos ambientales a los que nos enfrentamos, por lo que se está impulsando un cambio de estrategia, pasando ahora a la adopción de un método que represente un sistema económico diseñado para eliminar los residuos y garantizar el uso continuo de los recursos, al que se le llama economía circular.

En este modelo se crea valor mediante la producción y venta de los bienes y servicios, es decir, entre más se produzca, más valor se genera, se enfoca en extender el ciclo de vida de los productos, materiales y recursos mediante un diseño cuidadoso, es un modelo integral de producción, distribución y consumo de bienes, productos y servicios, orientado al rediseño y reincorporación de los mismos, para mantener en la economía el mayor tiempo posible el valor y vida útil de los materiales y los recursos asociados a ellos, y que de esta forma se prevenga o minimice la generación de residuos y la extracción de materia prima, reincorporándolos en procesos productivos cíclicos o biológicos, además de fomentar cambios de hábitos de producción y consumo (Tapiá et al., 2021).

Dentro de este modelo los plásticos biodegradables, son de vital importancia, ya que empiezan a reemplazar de manera efectiva a los plásticos tradicionales junto con la economía lineal, ofreciendo una solución sostenible a los problemas ambientales. Los plásticos biodegradables se descomponen en compuestos naturales mediante la actividad microbiana, reduciendo el impacto en los ecosistemas y la salud humana (Rahman et al., 2023). Especialmente en los entornos marinos, donde la contaminación por plásticos es alarmante, esta capacidad proporciona una solución sostenible al creciente problema de los residuos plásticos.

En este contexto, surge la necesidad de optimizar y ampliar el uso de biomateriales como el PLA, este plástico biobasado y biodegradable, no solo contribuyen a la conservación de recursos finitos al utilizar materiales renovables, como almidones vegetales o productos de fermentación microbiana en su producción, sino también el aprovechamiento de PLA reciclado permite disminuir la dependencia de recursos vírgenes y contribuir a cerrar el ciclo de vida del material, alineándose con los principios de la economía circular.

Con respecto al reciclaje y revalorización de productos elaborados con el ácido poli láctico, se presentan diversas tecnologías como la despolimerización química, solvólisis, reciclaje mecánico (mecanoquímico), hidrólisis enzimática, fermentación, gasificación y enfoques hídricos, y abordan un tema crucial para los fabricantes de material plástico (Jannatiha & Gutiérrez, 2025).

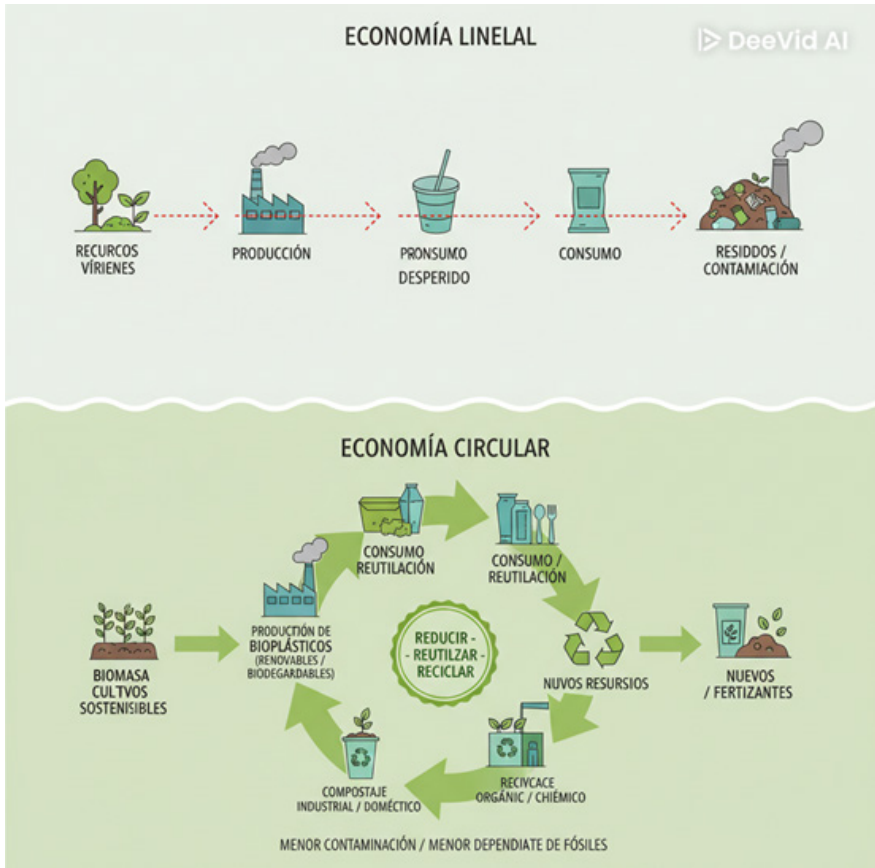


Figura 3. Diagrama que presenta la propuesta de un sistema hidropónico adaptado a los conceptos de la bioeconomía y de la economía circular. Fuente: Chatterjee et al. (2025)

El auge de las impresoras 3D en los últimos años ha provocado un aumento considerable en la demanda de plásticos como materia prima entre los cuales destacan el polietileno tereftalato glicolizado (PETG), poliamida PA6/PA12 (Nylon) y el ácido poliláctico (PLA), siendo el PLA el más utilizado en la impresión 3D por su alta facilidad de extrusión, baja deformación y buena precisión y es utilizado para la fabricación de prototipos, piezas decorativas, modelos educativos entre otros. Y esto ha ocasionado que se genere grandes cantidades de residuos de impresiones de 3D provenientes

del PLA, de modo que se deben buscar estrategias innovadoras para tratar dichos residuos.

Debido a todo lo anterior, recientemente en el grupo de investigación del Centro Avanzado de Pruebas Analíticas No Destructivas, se ha comenzado a trabajar con membranas poliméricas base PLA/almidón, donde el PLA se obtiene de residuos de impresión 3D y el almidón que se trabaja se obtiene de desechos de hueso de aguacate, incorporando ambos elementos en un esquema de economía circular, que permita reintegrarlos a la cadena de valor a través de

productos plásticos de un sólo uso, que una vez terminen su tiempo de vida puedan reintegrarse a la tierra y no generar más residuos sólidos ni microplásticos en el ambiente.

Conclusión

Los plásticos son esenciales para múltiples sectores industriales y constituyen un motor económico importante tanto para México como para el estado de Puebla. No obstante, el modelo lineal de producción, uso y desecho se ha vuelto insostenible frente a los desafíos ambientales actuales.

En este contexto, los bioplásticos surgen como alternativas sostenibles e innovadoras para disminuir la dependencia de recursos fósiles y mitigar la contaminación asociada a los polímeros convencionales. La transición hacia una economía circular se perfila como un elemento clave para cerrar ciclos de uso, reducir la generación de residuos y maximizar la eficiencia en el uso de recursos.

El PLA destaca como una de las alternativas más prometedoras, al ser un polímero biobasado, biodegradable y potencialmente reciclable, con capacidad para integrarse en esquemas de recuperación y revalorización de materiales. El trabajo desarrollado en el CAPAND —al utilizar residuos de PLA de impresión 3D y almidón obtenido de desechos de hueso de aguacate para la fabricación de membranas poliméricas biodegradables— ejemplifica este enfoque.

Esta propuesta demuestra la viabilidad técnica de reincorporar desechos orgánicos y poliméricos en nuevos productos y representa un avance concreto hacia la creación de materiales de un solo uso que puedan reintegrarse de manera segura al medio ambiente al término de su ciclo de vida. Los resultados y enfoques descritos fortalecen la visión de que la innovación en biopolímeros y la economía circular son rutas indispensables para enfrentar la crisis global de contaminación por plásticos y promover un futuro ambiental más responsable.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (*ChatGPT, COPILOT, etc.*) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Avanzado de Pruebas Analíticas no Destructivas por el espacio y los recursos proporcionados para el desarrollo de las investigaciones presentes.

Referencias

- Al Khoeriyah, Z. B., & Sembiring, E. (2024). Migration and accumulation patterns of plastic waste in the environment: A comprehensive simulation study. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36502>
- Castillejos, S., Cerna, J., Meléndez, F., Castro, M. E., Aguilar, R., Márquez-Beltrán, C., & González, M. (2018). Bulk modification of poly(lactide) (PLA) via copolymerization with poly(propylene glycol) diglycidylether (PPGDGE). *Polymers*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/polym1011184>
- Dimassi, S. N., Hahladakis, J. N., Yahia, M. N. D., Ahmad, M. I., Sayadi, S., & Al-Ghouthi, M. A. (2022). Degradation-fragmentation of marine plastic waste and their environmental implications: A critical review. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(11), 104262. <https://doi.org/10.1016/j.ARABJC.2022.104262>
- Ghaffari, P., van Bavel, B., Bambulyak, A., Johansen, N. E., & Safarov, E. (2025). River-to-sea plastic pollution: A pilot toolbox for the Caspian Sea. *Chemosphere*, 387, 144667. <https://doi.org/10.1016/j.CHEMOSPHERE.2025.144667>
- Global Plastics Outlook. (2022). *Global Plastics Outlook ECONOMIC DRIVERS, ENVIRONMENTAL IMPACTS AND POLICY OPTIONS*. OECD Publishing.
- Gobierno de México, S. de E. (2025, November 14). Puebla, Entidad Federativa. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/puebla-pu>
- Grand View Horizon. (2025, November 14). Tamaño y perspectivas del mercado de ácido poliláctico en México, 2023-2030. https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/polylactic-acid-market/mexico?utm_source=chatgpt.com
- Jannatiha, N., & Gutiérrez, T. J. (2025). Recycling and revalorization of PLA and PHA-based food packaging waste: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 44, e01364. <https://doi.org/10.1016/j.SUSMAT.2025.E01364>
- Jiang, D. H., Satoh, T., Tung, S. H., & Kuo, C. C. (2022). Sustainable Alternatives to Nondegradable Medical Plastics. In *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* (Vol. 10, Issue 15, pp. 4792–4806). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00160>
- Juan Carlos Natale. (2025, June 25). En el Estado de Puebla se proyecta que la Industria del Plástico tenga un crecimiento del 3.6 del PIB en el 2026: Juan Carlos Natale. <https://expoplásticos.mx/2026/en-el-estado-de-puebla-se-proyecta-que-la-industria-del-plastico-tenga-un-crecimiento-del-3-6-del- PIB-en-el-2026-juan-carlos-natale/>
- Khosravi, A., Fereidoon, A., Khorasani, M. M., Naderi, G., Ganjali, M. R., Zarrintaj, P., Saeb, M. R., & Gutiérrez, T. J. (2020). Soft and hard sections from cellulose-reinforced poly(lactic acid)-based food packaging films: A critical review. *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100429. <https://doi.org/10.1016/j.FPSL.2019.100429>
- Kushwaha, M., Shankar, S., Goel, D., Singh, S., Rahul, J., Rachna, K., & Singh, J. (2024). Microplastics pollution in the marine environment: A review of sources, impacts and mitigation. *Marine Pollution Bulletin*, 209, 117109. <https://doi.org/10.1016/j.MARPOLBUL.2024.117109>
- Masud, R. I., Suman, K. H., Tasnim, S., Begum, M. S., Sikder, M. H., Uddin, M. J., & Haque, M. N. (2023). A review on enhanced microplastics derived from biomedical waste during the COVID-19 pandemic with its toxicity, health risks, and biomarkers. *Environmental Research*, 216, 114434. <https://doi.org/10.1016/j.ENVRES.2022.114434>
- Mihai, F. C., Gündoğdu, S., Khan, F. R., Olivelli, A., Markley, L. A., & Van Emmerik, T. (2022). Plastic pollution in marine and freshwater environments: abundance, sources, and mitigation. *Emerging Contaminants in the Environment: Challenges and Sustainable Practices*, 241–274. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85160-2.00016-0>
- Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., & Beas, I. N. (2021). An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries. *Recycling*, 6(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>
- Rahman, M. N., Shozib, S. H., Akter, M. Y., Islam, A. R. M. T., Islam, M. S., Sohel, M. S., Kamaraj, C., Rakib, M. R. J., Idris, A. M., Sarker, A., & Malafaja, G. (2023). Microplastic as an invisible threat to the coral reefs: Sources, toxicity mechanisms, policy intervention, and the way forward. *Journal of Hazardous Materials*, 454, 131522. <https://doi.org/10.1016/j.JHAZMAT.2023.131522>

- Ramli, A. H. M., Manaf, L. A., Zulkeflee, Z., & Andriyono, S. (2024). Advancing circular economy approaches in plastic waste management: A systematic literature review in developing economies. *Sustainable Production and Consumption*, 51, 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.08.018>
- Roman, L., Hardesty, B. D., & Schuyler, Q. (2022). A systematic review and risk matrix of plastic litter impacts on aquatic wildlife: A case study of the Mekong and Ganges River Basins. *Science of The Total Environment*, 843, 156858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156858>
- Sahi, H., Aguilera del Real, A. M., Alcayde, A., Bueno, M. J. M., Wang, C., Hernando, M. D., & Fernández-Alba, A. R. (2025). Key insights into microplastic pollution in agricultural soils: A comprehensive review of worldwide trends, sources, distribution, characteristics and analytical approaches. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 185, 118176. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118176>
- Sahandi, J., Sorgeloos, P., Tang, K. W., Jafaryan, H., Mai, K., & Zhang, W. (2026). Sea salt associated microplastics amplify pathogenic *Vibrio* and impair development in brine shrimp (*Artemia franciscana*). *Marine Pollution Bulletin*, 222, 118895. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118895>
- Shen, Z., Jia, Z., Gao, L., Qin, L., Zhang, J., Sun, H., Qi, J., & Yin, J. (2025). CO₂-Enhanced methanolysis: A sustainable route for the depolymerization of PLA and PET-rich mixed plastic waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 204, 108128. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.108128>
- Tapia, C., Bianchi, M., Pallaske, G., & Bassi, A. M. (2021). Towards a territorial definition of a circular economy: exploring the role of territorial factors in closed-loop systems. *European Planning Studies*, 29(8), 1438–1457. <https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1867511>