

Carolina Peña Montes, Luis A. Peralta Peláez y Amelia Farrés

Biorremediación de la contaminación por plásticos

Desde su invención, los plásticos permitieron diseñar productos de alta resistencia a la degradación; sin embargo, su acumulación provoca inmensos daños a los ecosistemas. Las técnicas para eliminarlos incluyen procesos químicos y térmicos que también pueden ser nocivos, pero la biotecnología ofrece métodos limpios llevados a cabo por organismos vivos o sus partes para ayudar a resolver este problema.

¿Por qué es tan difícil degradar un plástico?

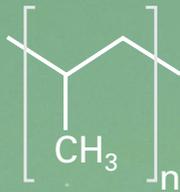
Los plásticos son **polímeros** sintéticos elaborados a partir de petróleo; las condiciones de fabricación dependerán de cada tipo de polímero y de las características del plástico resultante. Por ejemplo, el xileno, obtenido de la refinación de este combustible fósil, se transforma químicamente a ácido tereftálico, uno de los monómeros que forman el polímero denominado polietilentereftalato (PET), el cual fue inventado en 1941 por John Rex Whinfield y James Tennant Dickson y tuvo su principal aplicación a partir de 1976 cuando se utilizó para fabricar envases rígidos para embotellar bebidas carbonatadas. El proceso de fabricación del ácido tereftálico requiere de altas temperaturas (200 °C) y presiones (2 000 kPa), y la síntesis del polímero sucede a temperaturas todavía mayores, con los consiguientes gastos energéticos y la liberación de gases de efecto invernadero.

Químicamente, los plásticos contienen enlaces que son difíciles de romper mediante la aplicación de tratamientos suaves, como ácidos o álcalis (véase la Figura 1); además, incluyen aditivos o sustancias de diferente naturaleza química que los hacen resistentes y dificultan la separación de los monómeros. Por otro lado, el origen sintético de los plásticos impide que sean fácilmente degradados por la mayoría de los microorganismos que usualmente descomponen la materia orgánica que se encuentra en la naturaleza.

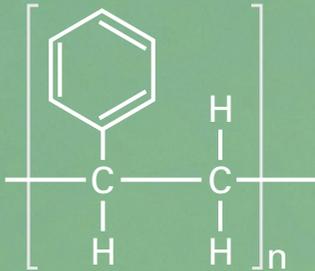
El uso de los plásticos se ha extendido de tal manera que hoy se encuentran acumulados en todos los ambientes, principalmente debido al manejo inadecuado de sus residuos a lo largo de varias décadas (véase la Figura 2). El ritmo de crecimiento mundial de la producción de plásticos es tan rápido que resulta imposible que los

Polímeros

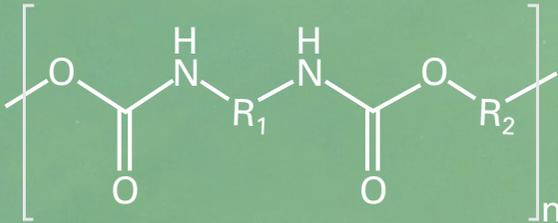
Moléculas de alto peso formadas por monómeros (unidades repetidas) unidos por enlaces químicos.



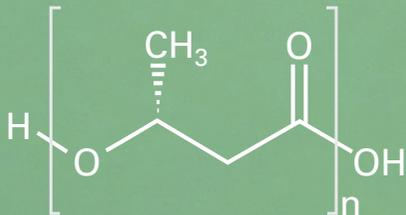
- 1** Polipropileno.
Enlaces Carbono-Carbono Alifático



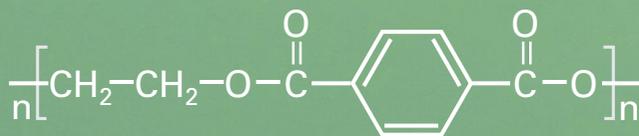
- 2** Poliestireno
Enlaces Carbono-Carbono con grupos aromáticos



- 3** Poliuretano
Enlaces heteroatómicos



- 4** Polihidroxicanoato
Biopoliéster



- 5** Polietilentereftalato
Poliéster con grupos aromáticos

Figura 1. Naturaleza química de los plásticos: 1) polipropileno (enlaces carbono-carbono alifático); 2) poliestireno (enlaces carbono-carbono con grupos aromáticos); 3) poliuretano (enlaces heteroatómicos); 4) polihidroxicanoato (biopoliéster); 5) polietilentereftalato (poliéster con grupos aromáticos).

Enzimas
Proteínas que actúan como catalizadores (aceleradores) de reacciones químicas.



Figura 2. Basura de plásticos con materia orgánica, principalmente madera y restos de vegetación en un ecosistema marino. Playa de Antón Lizardo, Veracruz, México. *Fotografía:* Luis Alberto Peralta Peláez.

Intemperización
Degradación de macroplásticos a microplásticos debido a la interacción con factores ambientales.

procesos de oxidación por luz solar, **intemperización** y destrucción mecánica los eliminan rápidamente, pero tras un tiempo prolongado se fragmentan y generan los llamados microplásticos (véase la Figura 3). Los tiempos estimados de degradación en condiciones ambientales normales son de cientos de años para la mayoría de los plásticos, por lo que se han integrado a los ecosistemas e incluso a la biodiversidad, con la consecuente plastificación del planeta. Por lo tanto, ante este panorama, existe la necesidad de degradarlos, es decir, reducirlos, al menos a sus monómeros, o incluso mineralizarlos, lo cual implica que sean convertidos a sustancias inorgánicas no tóxicas, como metano, dióxido de carbono y agua. Los procesos industriales de degradación pueden ser físicos, químicos y biológicos. En este artículo nos centraremos en la descripción de los últimos.



Figura 3. Microplásticos en la playa de Antón Lizardo, Veracruz, México. *Fotografía:* Luis Alberto Peralta Peláez.

Alternativas biotecnológicas

La definición más conocida de *biotecnología* es: “el uso de seres vivos o sus partes para la generación de bienes y servicios”. En el caso de la degradación de los polímeros contamos con varias herramientas que se basan en el uso de microorganismos, e incluso de organismos superiores, como larvas de insecto, o bien de sus **enzimas**. A la fecha existen múltiples procesos en los que participan comunidades microbianas, como los que ocurren en el composteo, en los rellenos sanitarios o en los reactores de tratamiento de aguas. Así, las estrategias biotecnológicas incluyen la inoculación con microorganismos que tienen capacidades de biodegradación y son aprovechados con el fin de lograr mayor eficiencia y reducir los tiempos de degradación. Otra alternativa es la biocatálisis, en la cual los enlaces de los polímeros se rompen con enzimas específicas en condiciones suaves (1 atm de presión y temperaturas entre 20 y 50 °C).

Cabe señalar que la introducción de los plásticos es tan reciente en términos evolutivos que es difícil encontrar organismos capaces de degradarlos si los enlaces no presentan alguna similitud con otros polímeros existentes en la naturaleza. En este sentido, destaca el papel de las enzimas cutinolíticas producidas por hongos fitopatógenos, las cuales degradan polímeros complejos naturales como la cutina, un material ceroso que recubre a los frutos para protegerlos del ataque de microorganismos como los hongos. Las cutinasas como una herramienta valiosa para la descontaminación de residuos plásticos (Peña Montes y cols., 2018) han mostrado ser importantes para la degradación de diversos poliésteres además del PET (véase la Figura 4), polímeros que resultan ser los más fáciles de romper enzimáticamente. El único organismo encontrado capaz de degradar un poliéster con enzimas aparentemente específicas es *Ideonella sakaensis*, aislado en 2016 en un tiradero de plásticos en Japón, el cual produce dos enzimas que actúan en conjunto para la degradación del PET: una es la denominada PETasa, con mayor especificidad por este polímero que otras enzimas capaces de degradarlo a compuestos intermediarios; y la otra es la MHETasa, que lleva a cabo la degradación completa.



Figura 4. Crecimiento de un hongo fitopatígeno en microplásticos de PET, visto mediante un microscopio estereoscópico con aumento de 80x. Fotografía: Luis Alberto Peralta Peláez.

¿A qué podemos transformar los plásticos existentes?

A partir de los procesos descritos anteriormente, se tienen varias alternativas. Una de ellas consiste en lograr la mineralización completa de la cadena de carbonos para convertirlos en dióxido de carbono, metano, compuestos volátiles y ácidos orgánicos. El metano obtenido puede emplearse como fuente de energía. Otra estrategia es recuperar los monómeros originales y emplearlos posteriormente para sintetizar otra vez el polímero original o nuevas materias primas. Esto es un proceso de economía circular. Aunque no se logre la degradación total, llegan a obtenerse cadenas de menor tamaño que pueden tener otras funciones tecnológicas con respecto a los polímeros originales. Idealmente, los organismos capaces de emplear los plásticos o sus metabolitos como fuente de carbono podrían ser aprovechados para producir biomasa, con aplicaciones en alimentación, fertilizantes o generación de biocombustibles.

Los microorganismos degradadores

Con el paso de los años se ha acrecentado la lista de microorganismos capaces de degradar uno o varios tipos de polímeros contenidos en los plásticos (véase la Tabla 1). En algunos casos se conoce la vía metabólica que lo permite; en otros se han identificado enzimas específicas, como lacasas, poliuretanasas, PETasas, cutinasas, esterases, proteasas o depolimerasas. La estrategia más común para encontrar a este

tipo de microorganismos es tomar muestras de zonas ricas en desechos plásticos y cultivarlas en medios con el plástico que se desea degradar como fuente de carbono. El crecimiento indicará la capacidad degradativa de la especie. En los últimos años, las muestras se analizan en términos de su **metagenoma** y se buscan genes que codifican para las enzimas antes mencionadas, tras lo cual se evalúan funcionalmente sobre el sustrato a degradar.

Cabe mencionar que el caso más eficiente reportado de degradación enzimática de PET corresponde a una cutinasa aislada del metagenoma de composta, un proceso de economía circular que se encuentra ya en etapa preindustrial en Francia. Es importante añadir que para su aplicación a nivel industrial es necesario hacer uso de la ingeniería genética con el fin de introducir el gen que tiene la información para la producción de la cutinasa en otros organismos huéspedes que la produzcan en mayor cantidad y en condiciones más controladas. Los organismos recombinantes no se introducirían al ambiente, sino que se emplearían en los reactores industriales.

Por otro lado, quizás hayamos oído hablar de los gusanos que comen plástico: se trata de diversos tipos de larvas de insecto (la más conocida, *Tenebrio molitor*, el gusano blanco de la harina) que pueden ser cultivadas en restos de poliestireno, donde irán incrementando su biomasa. Se ha descubierto que la capacidad de degradación radica en su microbioma, del que se han aislado varias especies bacterianas. La biomasa producida puede ser empleada como fertilizante o en la alimentación de diversos animales.

Asimismo, en los ambientes acuáticos resulta fundamental el papel de las algas. Dada su adapta-

Metagenoma

Conjunto de genes de microorganismos de un ecosistema determinado.

Tabla 1. Microorganismos degradadores de plásticos.

Microorganismo	Plástico
<i>Ideonella sakaensis</i>	PET
<i>Thermobifida fusca</i>	PET, PHA, PCL, PL
<i>Aspergillus nidulans</i>	PET, PCL, PL, PBS,
<i>Pseudomonas sutzeri</i>	PP
<i>Alicyclophilus BQ1</i>	PU
<i>Cochliobolus</i> sp.	PVC
<i>Rhodococcus ruber</i>	PS

ción a diversos microambientes y profundidades, las podemos encontrar en diferentes áreas afectadas por la contaminación por plásticos. Ahí, se ha demostrado su capacidad tanto para la adsorción como para la detoxificación de los plásticos y, en algunos casos, la completa mineralización.

■ Implementación de estrategias a futuro

■ A la fecha, la mayor parte de los residuos plásticos generados en el mundo son depositados en rellenos sanitarios, mientras una pequeña fracción se incinera y un porcentaje variable se recicla. En este último aspecto, los valores van de casi cero en Estados Unidos de América a aproximadamente 60% de reciclaje “botella a botella” de PET en México, mientras que en Europa la meta es llegar a 30% en 2030. El reúso de plásticos, el incremento de su reciclaje y la eliminación de los plásticos de un solo uso son fundamentales para alcanzar los objetivos globales de sustentabilidad de las Naciones Unidas para el mismo año. La implementación exitosa de esta estrategia implica una cuidadosa separación de los polímeros según su naturaleza química, ya que de ello depende el tratamiento a aplicar. Este proceso es complejo porque requiere de la educación y colaboración de muchos agentes involucrados desde la producción hasta el consumo.

Composteo y rellenos sanitarios

Uno de los mayores pendientes es mejorar el manejo de los rellenos sanitarios y de los procesos de composteo. La diferencia entre ellos radica en el nivel de oxígeno requerido –más elevado en el composteo–, pero en ambos casos se produce dióxido de carbono y metano. Las estrategias biotecnológicas para mejorar estos procesos incluyen el aislamiento de microorganismos y la caracterización metagenómica de los depósitos, para identificar a los más eficientes, inocularlos en las zonas de depósitos de desechos con el objetivo de alcanzar una mayor eficiencia en la degradación de plásticos y permitir su crecimiento de acuerdo con las mejores condiciones de temperatura, pH, oxigenación, cantidades de sustrato, tiempos de residencia, entre otros. Idealmente, se podrán aco-

plar a procesos de recuperación de lixiviados para obtener productos químicos de interés; en el proceso pueden generarse microplásticos, cuya dispersión más allá de la zona de degradación se deberá detener.

Plantas de tratamiento de aguas

Por otra parte, las aguas pueden ser tratadas en reactores aerobios o anaerobios donde se desarrollan comunidades microbianas que pueden ser enriquecidas con microorganismos específicos para el tratamiento de ciertos residuos, como es el caso de los plásticos. Para ello, es fundamental la caracterización de las comunidades microbianas en términos de composición y dinámica, así como la búsqueda de métodos para incorporar a los microorganismos idóneos para la degradación de los diferentes tipos de plástico. En estudios recientes se ha visto que las aguas y lodos salientes de un proceso de tratamiento pueden ser una fuente importante de microplásticos, que van tanto a sistemas agrícolas como acuáticos. Ante esto, será importante acoplar a los sistemas de tratamiento herramientas como sistemas de filtración, aglomeración y de biorremediación que ayuden a paliar este problema.

■ Problemas específicos de la degradación de microplásticos

■ Los microplásticos pueden ser primarios, cuando se diseñan para tener ese tamaño, o secundarios, cuando provienen de la degradación de piezas de mayor tamaño tras su intemperización. El primer problema que plantea su tratamiento es la dispersión de los residuos, así como la heterogeneidad de su naturaleza química. En algunos casos se forman **biopelículas** que pueden ser colonizadas por microorganismos degradadores, pero adicionarlos a los cuerpos de agua no es una estrategia viable para resolver el problema porque el impacto ecológico podría ser peor.

■ Conclusión

■ Como hemos visto, se dispone de diversas herramientas biotecnológicas para lograr la transformación de los plásticos en nuevos materiales o en energía. Las soluciones son multidisciplinarias y es necesario

Biopelículas

Comunidad de microorganismos adheridos a superficies mediante polímeros secretados.

evaluar el impacto ambiental de cada estrategia, con el fin de establecer una economía circular que permita degradar biológicamente los residuos generados hasta sus monómeros para su posterior reciclaje, o bien lograr la degradación completa (mineralización) para generar sustancias orgánicas no tóxicas que se integren al ambiente. Adicionalmente, con los diversos tratamientos es factible pensar en métodos para la obtención de energía.

Las tareas más importantes que se deben desarrollar para lograr el éxito de las estrategias biotecnológicas consisten en la caracterización de metagenomas y comunidades microbianas para identificar a las enzimas y vías degradativas específicas para cada tipo de plástico. Incluso es posible pensar en biorreactores para el tratamiento de plásticos por medio de microorganismos o sus enzimas. De hecho, en los próximos dos años se iniciará en Francia un proceso enzimático de degradación de PET a nivel industrial, aplicable a otros poliésteres, para procesar miles de toneladas a la semana. Adicionalmente, existen ensayos de producción de bioplásticos, como polihidroxialcanoatos, a partir del crecimiento de biomasa en plástico. Los microorganismos aislados y seleccionados podrán ser posteriormente incorporados a sistemas tradicionales, como composteo, rellenos

sanitarios o plantas de tratamiento de aguas para garantizar la degradación más completa posible. Idealmente, podrán buscarse sistemas de inmovilización de microorganismos o de algas en puntos específicos, tanto en reactores como en estanques, para reducir la presencia y toxicidad de los microplásticos. De esta manera, la participación de la biotecnología en la carrera contra la invasión del plástico en los ecosistemas del mundo apenas ha comenzado.

Carolina Peña Montes

Laboratorio de Genética Aplicada, Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Tecnológico Nacional de México campus Veracruz.

carolina.pm@veracruz.tecnm.mx

Luis A. Peralta Peláez

Laboratorio de Ingeniería Ecológica Ambiental y Ciencias, Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Tecnológico Nacional de México campus Veracruz.

luis.pp@veracruz.tecnm.mx

Amelia Farrés

Departamento de Alimentos y Biotecnología, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.

farres@unam.mx

Referencias específicas

- Farrés, A., C. Peña Montes, E. Hernández, S. Morales, M. Sánchez e I. Solís (2021), "Cutinasas recombinantes de *Aspergillus nidulans* para degradación de poliésteres", Patente Mexicana 380946.
- Masiá, P., D. Sol, A. Ardura, A. Laca, A. Y. Borrell, E. Dopico, A. Laca, G. Machado-Schiaffino, M. Díaz y E. García Vázquez (2020), "Bioremediation as a promising strategy for microplastic removal in wastewater treatment plants", *Marine Pollution Bulletin*, 156:111252.
- Peña Montes, C., E. Bermúdez García, S. L. Morales García y A. Farrés (2018), "Las cutinasas como una herramienta valiosa para la descontaminación de residuos plásticos", *Mensaje Bioquímico Español*, 42:24-35.
- Peña Montes, C. y L. A. Peralta Peláez (2018), "Plastificación de la biodiversidad", en V. Ávila Akerberg y T. González Martínez (comps.), *Biodiversidad, servicios ecosistémicos y los objetivos de desarrollo sostenible en México*, México, DAAD-UAEM, pp. 191-210.
- Peralta Peláez, L. A., C. Hernández Álvarez, C. Peña Montes y L. E. Sánchez Higaredo (2020), "Explorando la situación de los plásticos en el medio ambiente para el acceso al agua potable segura en ciudades y comunidades", en M. C. Durán Domínguez de Bazúa (comp.), *Sustentabilidad y desarrollo I. Aspectos socioecológicos*, México, UNAM-DAAD, pp. 79-91.
- Ru, H., Y. Huo y Y. Yang (2020), "Microbial degradation and valorization of plastic wastes", *Frontiers in Microbiology*, 11: 442.
- Sun, J., Z. Zhu, W. Li, X. Yan, L. Wang, L. Zhang, J. Jin, X. Dai y B. Ni (2021), "Revisiting microplastics in landfill leachates: unnoticed tiny microplastics and their fate in treatment works", *Water Research*, 190:116784.
- Tournier, V. et al. (2020), "An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles", *Nature*, 580:216.
- Yoshida, S., K. Hiraga, T. Takehana, I. Taniguchi, H. Yamaji, Y. Maeda, H. Toyohara, K. Miyamoto, Y. Kimura y K. Oda (2016), "A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate)", *Science*, 351 (6278):1196-1199.