

Ciencia para
las Políticas
Públicas



Combatir la contaminación por plásticos

Coordinado por:

Auxiliadora Prieto · Juan Rodríguez Hernández · Cinta Porte Visa · Amparo López-Rubio

 **CSIC**
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

SCIENCE  POLICY



Ciencia para Las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

SCIENCE  POLICY

Este es un libro de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional [CC BY 4.0].
Más información sobre esta licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

EDITORIAL CSIC: <http://editorial.csic.es> [correo: publ@csic.es]



Departamento de Comunicación

Gabinete de Presidencia
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Calle Serrano 117
28006 Madrid
Email: comunicacion@csic.es

NIPO: 833-23-072-2

e-NIPO: 833-23-073-8

Depósito Legal: M-20235-2023

Edición no venal

Coordinado por:

Auxiliadora Prieto
Juan Rodríguez Hernández
Cinta Porte Visa
Amparo López-Rubio

Coordinador de la colección Ciencia para las Políticas

Públicas:
Alberto Mercado

Edición:

Belén Remacha
Sofía Iglesias

Fotógrafos:

ICTP, CIB, IATA,
ICB, IDAEA, CID

Infografía:

Yolanda Clemente

Ilustración:

Irene Cuesta

Diseño y maquetación:

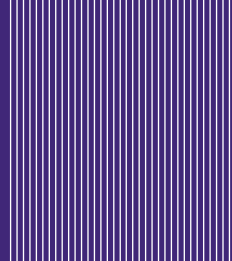
David Pamplona Roche

Impreso en España. *Printed in Spain*

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.



El CSIC tiene entre sus funciones la de informar, asistir y asesorar en materia de ciencia y tecnología a entidades públicas y privadas, según recoge el artículo 5 de su Estatuto. Enmarcado en esta función, el informe *Combatir la contaminación por plásticos*, de la colección Ciencia para las Políticas Públicas, se presenta como un documento dirigido a administraciones y a la sociedad en general. Así, este documento analiza el problema medioambiental y de salud que supone el aumento de la producción de plásticos y la liberación de micro- o nanoplásticos y otros aditivos al entorno, presentándose posibles estrategias para reducir dicha contaminación.

El informe aborda la investigación que se realiza desde el CSIC para alcanzar la producción sostenible de plásticos y establecer las bases de la economía circular en este sector, lo que incluye estrategias químicas, aproximaciones biotecnológicas e incluso la contribución a la regulación y certificación de materiales poliméricos más sostenibles.

ÍNDICE

uno



La contaminación por plásticos

- 1.1. Introducción
- 1.2. Situación actual
- 1.3. El problema medioambiental y de salud: los microplásticos
- 1.4. Estrategias para reducir la contaminación: hacia una economía circular
- 1.5. Retos concretos en la gestión de bioplásticos

dos



Iniciativas para afrontar el problema

- 2.1. Estrategias químicas para una economía circular
- 2.2. Procesos y aproximaciones biotecnológicas
- 2.3. Efectos de la contaminación por plásticos en el medioambiente y en la salud humana
- 2.4. Contribución en la regulación y certificación de materiales poliméricos más sostenibles

tres



Conclusiones y recomendaciones

cuatro



Listado de centros





UNO



La contaminación por plásticos

11

Introducción

VIVIMOS en la era del plástico. En la actualidad, podemos encontrar este material en múltiples formas de nuestro entorno. Lo encontramos en el champú con el que nos lavamos el pelo por la mañana, en la ropa que vestimos, en el café de la oficina, en la compra de la semana e incluso en los edificios que habitamos. El plástico se encuentra en todas partes y apenas podemos evitarlo. El porqué radica en cuatro de sus características: es versátil, ligero, barato y duradero.

La evidencia de que vivimos en la «era del plástico» se comprueba en cuanto levantamos la vista, pero también cuando analizamos los datos disponibles: la humanidad comenzó a producir este material a mediados del siglo XX, y desde entonces se han producido 8700 millones de toneladas de plástico. Anualmente, la producción asciende a 390 millones de toneladas anuales. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) calcula que, continuando esta tendencia, en 2060 la humanidad alcanzará 1000 millones de toneladas anuales, triplicando la cantidad actual.

Sin embargo, una de las grandes ventajas de los plásticos, su gran durabilidad, es también uno de sus grandes problemas: la gran mayoría del plástico generado sigue y seguirá durante siglos acumulado en nuestro planeta, sin degradarse. El comienzo de la era del plástico implicó progreso, fue una de las grandes revoluciones de la historia. Pero también inició una gran amenaza medioambiental. Su uso y su gestión nos han conducido a una elevadísima contaminación de los ecosistemas terrestres y acuáticos: alrededor de 20 millones de toneladas de plástico se liberan cada año a lagos, ríos y mares. También a nuestras tierras: el uso generalizado de plástico en agricultura es una de las causas más importantes de contaminación y degradación de suelos.

Hay algo más. Los plásticos están formados por polímeros vírgenes a los que se les añaden aditivos para mejorar la procesabilidad y las propiedades finales de los materiales. Estos aditivos, liberados al medioambiente, exponen nuestra propia salud a químicos dañinos. Los microplásticos, asimismo, constituyen una amenaza nueva y diferente.

Gráfico 1.1 El ciclo de vida de los plásticos



- 1. Extracción y conversión.** Principales sectores involucrados: productores de materia prima, productores de monómeros, productores de polímeros. Derivados del petróleo: 99%. Biobasados: 1%.
- 2. Producción.** Principales sectores involucrados: empresas productoras o procesadoras de plástico. Más de 27 millones de toneladas de aditivos incorporados por año. Más de 438 millones de productos de plástico producidos por año.
- 3. Uso.** Principales sectores involucrados: distribuidores, consumidores. 0.6 % en maquinaria industrial; 16 % en edificios y construcción; 15 % en textiles; 4 % en el sector eléctrico y electrónico; 10 % en artículos institucionales y para el consumidor; 36 % en envases; 6.6 % en transporte.
- 4. Fin de vida.** Principales sectores involucrados: empresas de gestión de residuos. Más de 291 millones de toneladas de residuos plásticos generados por año. 151 millones de toneladas de plásticos en vertederos. 62 millones de toneladas recicladas (datos de residuos plásticos del 2018). 78 millones de toneladas incineradas.



En este sentido, solo los seres humanos producimos plástico y solo nosotros podemos encontrar alternativas viables. Tanto a nivel individual como global, las soluciones deben implicar a todas las partes: consumidores, productores y legisladores. Existen cuatro áreas principales que se están explorando como posibles soluciones:

- Reducción del uso de aditivos problemáticos.
- Mejora de la gestión de residuos.
- Diseño de plásticos más amigables con el medioambiente.
- Búsqueda de alternativas a los plásticos de origen fósil.

El objetivo final ha de ser cambiar el modelo establecido de economía lineal, para que estos materiales puedan ser reintegrados en la cadena de producción humana, siguiendo el concepto de la economía circular.

Durante este camino de cambios han aparecido muchos obstáculos. En 2020, la pandemia del COVID-19 sacudió el mundo y convirtió el plástico en una necesidad de salud pública, priorizada en ese momento sobre el problema medioambiental. Su uso se multiplicó: a los utensilios habituales se sumaron mascarillas, guantes, recipientes de gel hidroalcohólico, etc. Reconducida ya la crisis de COVID-19, existe en nuestra sociedad lo descrito como *efecto rebote*: cuanto más se extiende la práctica del reciclaje, también tendemos a consumir más, confiando en que el material será reciclado en su totalidad.

Sin embargo, el principal obstáculo en el camino hacia una economía circular es el factor tiempo. Corre en nuestra contra. Porque para lograr una transición exitosa necesitamos soluciones técnicas, pero también educación y aceptación de todos los actores sociales y empresariales.



Clasificaciones

Aunque existen muchos, el mercado está dominado por cuatro tipos principales de plástico:

- **Polietileno (PE):** bolsas de plástico, láminas y películas de plástico, contenedores, botellas, microesferas de cosméticos y productos abrasivos.
- **Polietilén tereftalato (PET):** botellas, envases, prendas de ropa, películas de rayos X, etc.
- **Polipropileno (PP):** electrodomésticos, muebles de jardín, componentes de vehículos, etc.
- **Policloruro de polivinilo (PVC):** tuberías y accesorios, válvulas, ventanas, etc.

Tipos de aditivos que pueden contener los plásticos y que pueden dañar la salud humana:

1. **Funcionales:** retardantes de llama, biocidas, agentes deslizantes, lubricantes, estabilizantes...
2. **Colorantes**
3. **Rellenos:** mica, talco, caolín, carbonato cálcico, sulfato de bario
4. **Refuerzos:** fibras de vidrio o de carbono



Si queremos que los bioplásticos sean el futuro, debemos abordar su producción y gestión de manera integral, incluyendo la evaluación de los posibles riesgos para el medio ambiente y la salud humana



1.2.

Situación actual

EL objetivo principal es reducir en plásticos, pero la realidad muestra que su producción está muy lejos de ralentizarse. En 2018 la producción mundial fue de 365,5 millones de toneladas. En 2021, de 390,7 toneladas.

El 90,2 % de los plásticos generados fueron productos elaborados con material virgen, de origen petroquímico. Solo el 8,3 % se fabricaron con material reciclado, y apenas el 1,5 % fueron productos elaborados con materiales de origen biológico (los conocidos como *biopolímeros*).

En 2019, el último año de cuya gestión tenemos datos desglosados, únicamente el 11 % de los plásticos comercializados fueron reciclados. Aproximadamente el 65 % se incineró o se envió a vertederos, y lo más preocupante es que un 22 % de los plásticos utilizados se acumuló en forma de basura sin ningún tratamiento ni control. Es decir, casi una cuarta parte de los plásticos producidos acabó en vertederos irregulares, fue vertido al mar o se quemó sin ningún tipo de precaución.

Gráfico 1.2 Producción mundial de plásticos

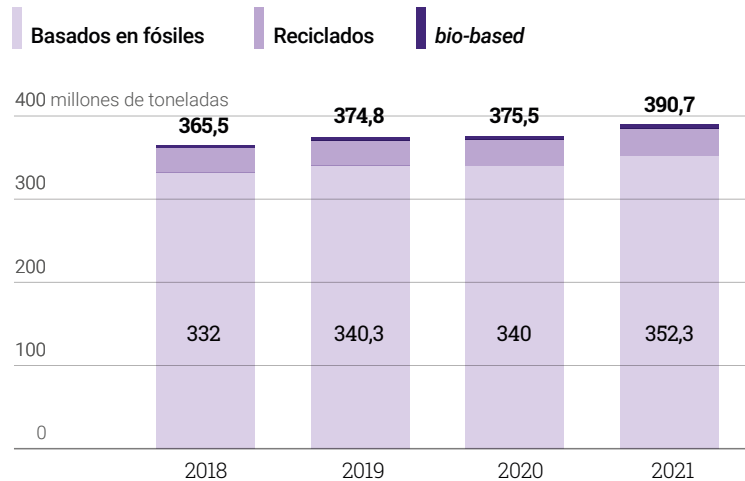
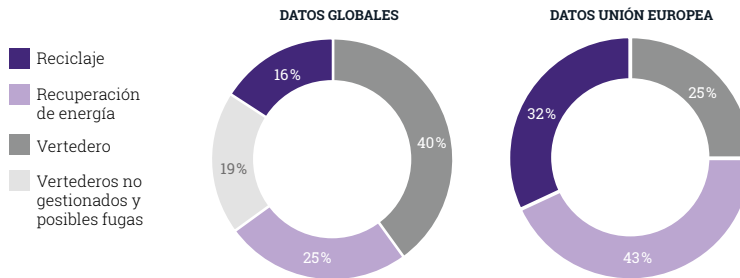


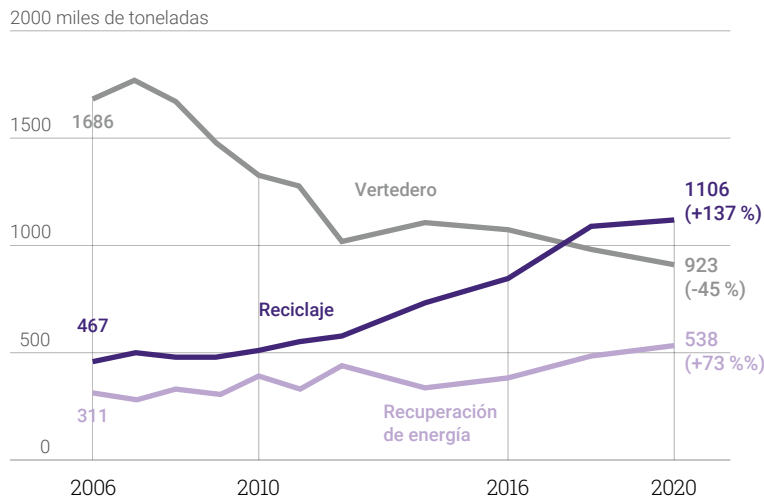


Gráfico 1.3 Polímeros más utilizados para el embalaje

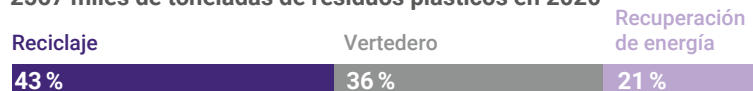


Las directivas sobre residuos de la UE establecieron impuestos a los vertederos que han frenado en parte esta marea, aumentando las tasas de reciclaje, aunque sigue siendo cuestionable la recuperación de energía mediante procesos de incineración controlada. La severidad de las medidas depende del país en cuestión: 24 de los 27 países de la UE tienen actualmente en vigor impuestos sobre los vertederos, mientras que 18 aplican directamente prohibiciones. Si miramos con lupa a nuestro país, España, hay un dato muy optimista: el reciclaje ha aumentado un 137 % entre 2006 y 2020.

Gráfico 1.4 Tratamiento de los residuos plásticos



2567 miles de toneladas de residuos plásticos en 2020





Regulación vigente a nivel mundial, europeo y nacional

A NIVEL MUNDIAL

Existen diferentes convenios internacionales que abordan la contaminación ambiental relacionada con los plásticos. Ejemplos:

- **Convenio de Estocolmo:** sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes: tratado mundial para proteger la salud humana y el medioambiente de los productos químicos que permanecen intactos en el medioambiente durante largos periodos de tiempo.
- **Convenio de Rotterdam:** compromiso de la UE para ejercer un control adecuado sobre el comercio y utilización de productos químicos peligrosos a nivel mundial para contribuir a la protección de la salud humana y del medioambiente dentro y fuera de sus fronteras.
- **Convenio de Basilea:** tiene como objetivo reducir al mínimo la generación de desechos peligrosos y su movimiento transfronterizo, así como de asegurar un manejo ambientalmente racional.

Sin embargo, hasta el momento no existen convenios específicos sobre contaminación por plásticos. Sí se vislumbran avances esperanzadores. En marzo de 2022, la **Asamblea de las Naciones Unidas** aprobó un acuerdo histórico (Resolución 5/14) para forjar un tratado mundial sobre los plásticos, que deberá ser aprobado para finales de 2024. El objetivo de este acuerdo es definir políticas y medidas concretas, incluyendo:

- Reducción del uso y producción de plásticos.
- Mejora de las capacidades en tratamiento de residuos, incluyendo la capacidad de reciclado.
- Búsqueda de plásticos sostenibles alternativos como sustitutos a los de origen fósil.



EN LA UNIÓN EUROPEA

Para mejorar la situación actual se han elaborado, a nivel europeo, reglamentos y directivas de aplicación directa a los países miembros. Entre ellos:

Reglamentos:

- El Reglamento 1907/2006, REACH, relativo al registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas.
- El Reglamento 1013/2006, relativo al traslado de residuos.
- El Reglamento 2019/20121, sobre contaminantes orgánicos persistentes.

Directivas:

- Directiva (UE) 2018/851, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.
- Directiva (UE) 2019/904, relativa a los plásticos de un solo uso (SUP: *single-use-plastic*).
- Directiva (UE) 2018/852 por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases [en 2023 aún se está negociando el reglamento].

PLANES DE ACCIÓN A NIVEL NACIONAL

En cada país, la normativa europea se desarrolla a través de leyes y reales decretos, y extienden su campo de aplicación a los productores mediante «responsabilidad extendida al productor». Actualmente, en el ámbito de los plásticos están vigentes la *Ley 7/2022, de 8 de abril, sobre residuos y suelos contaminados para una economía circular* y el *Real Decreto 1055/2022, de 27 de diciembre, sobre envases y residuos de envases*.

Queda mucho trabajo por hacer en áreas concretas como la de la contaminación por determinados productos difícilmente degradables (toallitas, globos, filtros de tabaco, etc.) o la de la elaboración de protocolos para la reducción de contaminación por microplásticos.

13.

El problema medioambiental y de salud: los microplásticos

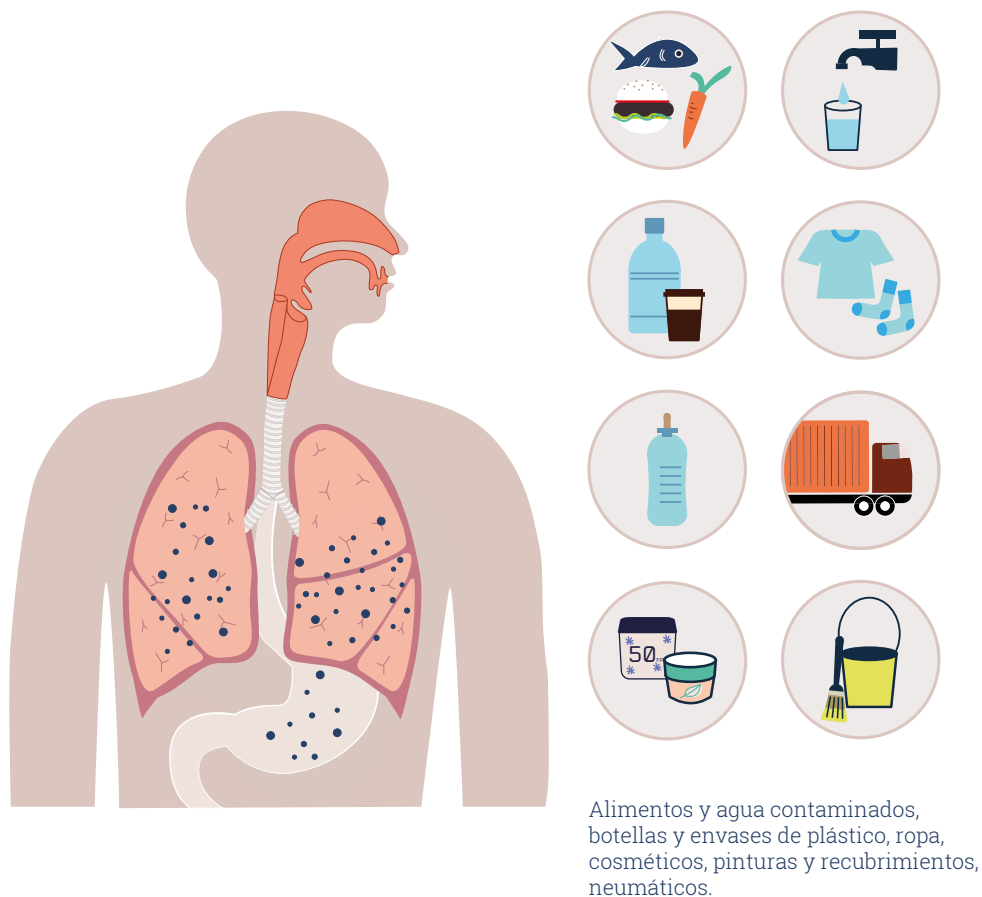
EN el siglo XXI, los plásticos se han convertido en un problema tanto para el medioambiente como para la salud humana. Durante mucho tiempo, los plásticos no se consideraban sustancias de riesgo para la salud, debido a su naturaleza inerte y, sobre todo, a su gran tamaño. Parecía poco probable que fueran absorbidos por el cuerpo humano. Sin embargo, en la actualidad, nos enfrentamos al problema emergente de los microplásticos (<5 milímetros) o incluso nanoplasticos (<1 micrómetro), que, a esa escala, sí pueden absorberse fácilmente.

Los micro- y nanoplasticos son liberados de muchas formas; por ejemplo, a través del desgaste de los neumáticos, pero también son consecuencia de la degradación gradual de los plásticos en el medioambiente. En algunos campos se fabrican directamente en esos tamaños, y aparecen formando parte de objetos utilizados en aplicaciones diversas, como puede ser la fotónica, la electrónica, la medicina o la cosmética. Y si la producción de plásticos no deja de crecer, tampoco lo hará la de los microplásticos.

Se han encontrado microplásticos en prácticamente todos los sitios en los que se han buscado, desde en lagos de alta montaña hasta en el hielo del Ártico y en fondos oceánicos. Hay microplásticos en el aire que respiramos, en el agua que bebemos y en los alimentos que comemos. Pero es verdaderamente difícil evaluar en detalle el daño que causan a la salud o al medioambiente a esa escala. Es un reto dentro del reto: hay que generar datos fiables y comparables con los distintos métodos de rastreo para poder estudiar bien los efectos y actuar en consecuencia.

En todo caso, se ha descrito la exposición humana a micro- y, en especial, a nanoplasticos por tres vías: inhalación, ingestión y absorción a través de la piel.

Existe una vía muy directa: los plásticos entran en la cadena trófica y llegan a nuestro plato a través de los organismos provenientes del mar. Una vez dentro, y dependiendo del tipo de plástico y de la cantidad a la que estamos expuestos, pueden penetrar en órganos como el cerebro y la placenta, y alterar su funcionamiento: pueden afectar a la reproducción, crecimiento, movilidad y desarrollo embrionario, entre otros. A nivel celular, se ha descrito un aumento de estrés oxidativo, procesos de inflamación, disminución de la estabilidad lisosomal, daños a nivel de ADN y neurotoxicidad.

Gráfico 1.5 Procedencia y entrada de los microplásticos en el cuerpo

En el efecto negativo de los plásticos sobre la salud humana y ambiental también entran en juego los aditivos. Los aditivos mejoran las propiedades de los plásticos (resistencia, color, flexibilidad...), pero también les confieren toxicidad. Además, puesto que no se encuentran químicamente unidos al polímero, se van liberando lentamente en el medioambiente o en los alimentos, y de esta forma pueden llegar a acumularse en distintos órganos y a producir distintos efectos, como alteraciones endocrinas y metabólicas (acumulación de lípidos/obesogénesis). Asimismo, existe la posibilidad de que los aditivos generen reacciones alérgicas graves en ciertas personas, lo que agrava aún más la preocupación por su uso en plásticos.

14.

Estrategias para reducir la contaminación: hacia una economía circular

EL objetivo de la gestión de residuos en la Unión Europea es alcanzar una economía circular, esto es, de reutilización. Esta perspectiva es esencial para evitar el aumento accidental o intencional de liberación de materiales plásticos en el medioambiente, y así frenar la contaminación ambiental. Para ello, se establecen prioridades en los métodos de gestión. La primera opción debería ser siempre la prevención de la generación de residuos, es decir, tratar de reducirlos. En segundo lugar, se promueve la preparación para la reutilización, el reciclaje y la recuperación. Por último, la opción menos deseable, y a la que solo se debería recurrir si han fallado las demás alternativas, es la eliminación de residuos, incluso en vertederos.

Consumo responsable y bajada de demanda

Es necesario replantearse la utilización de los envases de un solo uso y reconsiderar el diseño de los productos y los modelos de negocio. El objetivo sería reducir el 38 % (7,2 millones de toneladas) de la demanda de envases de plástico prevista para 2050 en la Unión Europea.

Los análisis demuestran que, con el apoyo normativo adecuado, así como con inversión en infraestructuras e investigación y desarrollo (I+D), es técnicamente posible lograr esta reducción, sin comprometer la funcionalidad y calidad de los productos.

Gestión de residuos eficiente: tecnologías y procesos de reciclado.

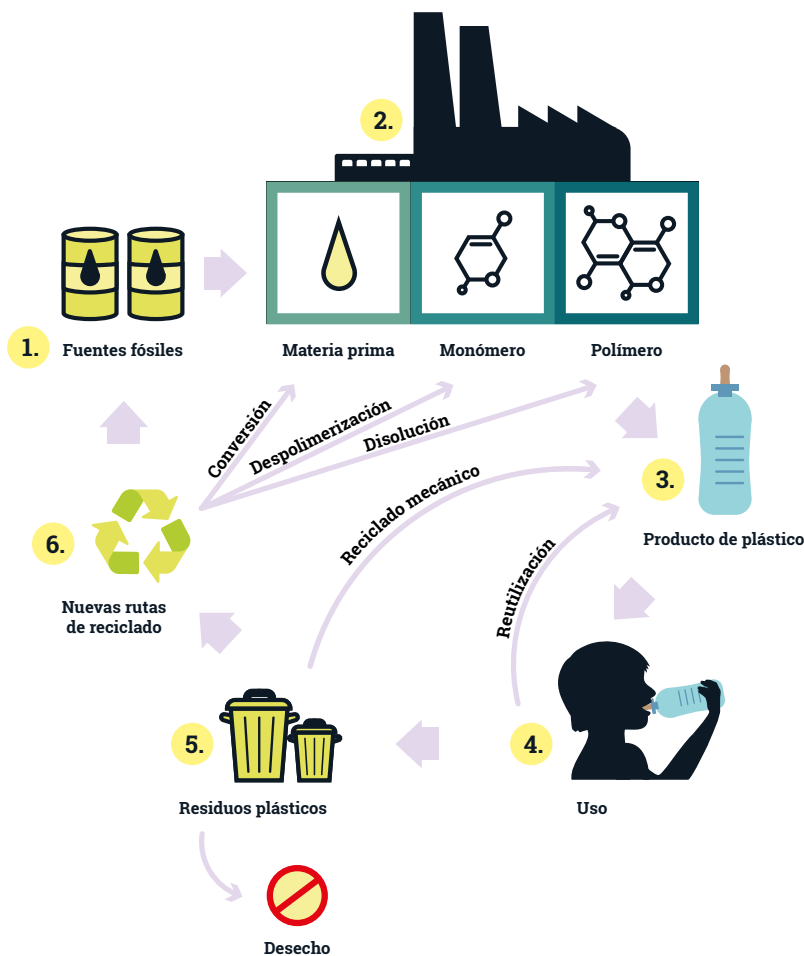
a) Reciclado mecánico

Se trata del método más común de reciclado en Europa y a nivel global. Requiere de cuatro pasos: recolección, clasificación, lavado y molienda, triturado y fundido del material. Pese a su éxito, requiere de mejoras en capacidad y eficiencia.

El reciclado mecánico se puede aplicar a tejidos y envases (PET o PP), a materiales de construcción (PP) y a casi todo producto fabricado con polietileno (PE), que es uno de los plásticos más usados y versátiles. Se usa, por ejemplo, en bolsas de la compra o para sillas plegables.



Gráfico 1.6 Gestión eficiente de residuos plásticos



El coste del proceso es moderado, pero requiere de separación exhaustiva y, por tanto, recursos y energía. Este método es sensible al tipo de aditivo empleado en la formulación del plástico, con lo cual el proceso de reciclaje puede afectar a propiedades del plástico, como la tenacidad y la dureza. Además, en cada ciclo de reciclado mecánico, las cadenas poliméricas se van rompiendo, lo que hace que el proceso dé lugar a materiales con peor calidad en los sucesivos ciclos de reciclado.

b) Reciclado químico

Es el segundo método más utilizado en Europa, pero a mucha distancia del primero.

A diferencia del reciclado mecánico, el reciclado químico produce la despolimerización del material y da lugar a sus monómeros precursores, es decir, a polímeros con propiedades idénticas al material virgen. Permite, por tanto, el reciclado de mezclas de más de un polímero. En muchos casos se puede reciclar indefinidamente el plástico, un proceso que suele denominarse reciclado de circuito cerrado.

Existen diferentes métodos de reciclado químico, y uno de ellos es la pirólisis. El proceso de pirólisis consiste en calentar los materiales a altas temperaturas en presencia limitada de oxígeno, hasta que el material se descompone en componentes que pueden utilizarse como combustible o como base para sintetizar nuevos polímeros.

c) Reciclado enzimático

Constituye otro tipo de reciclado químico basado en herramientas biotecnológicas. Utiliza enzimas para descomponer los polímeros en sus unidades básicas.

Este método se empezó a estudiar hace tres décadas, pero ha tenido impulso en el último lustro, después de investigaciones en Japón donde aislaron una bacteria (*Ideonella sakaiensis*), capaz de descomponer el polietilén tereftalato (PET).

Según los expertos, un biorreactor enzimático de 20 metros cúbicos, que siga este método, puede degradar 100 000 botellas de plástico en 20 horas, es decir, unas 50 000 toneladas de PET al año.

Sin embargo, el reciclado basado en enzimas sigue siendo costoso en comparación con otros métodos de reciclado. Por esta razón, actualmente se limita al reciclaje del PET y poliuretanos, dos polímeros que son más fáciles de descomponer que otros plásticos más recalcitrantes como el polipropileno (PP).



Ecodiseño

El ecodiseño es un proceso que se enfoca en considerar desde la etapa de fabricación que los materiales utilizados deberán ser reciclados en el futuro.

Por ejemplo, en esta era del plástico, los envases, que constituyen una gran parte de los residuos producidos, se han convertido en productos de alta ingeniería diseñados para satisfacer de la forma más económica posible las propiedades exigidas por el cliente. Haciendo uso del ecodiseño se pueden encontrar alternativas más sostenibles para la etapa de fabricación, como revestimientos metálicos o inorgánicos. Veremos más adelante iniciativas directamente aplicadas a este tipo de productos.

En el proceso de ecodiseño, la clasificación eficaz de los residuos para minimizar la contaminación por otros polímeros es fundamental para obtener productos de calidad a través de reciclado mecánico.

Uso de materias primas alternativas más sostenibles

Los bioplásticos de origen biológico han surgido como una alternativa muy importante a los plásticos tradicionales.

Estos materiales presentan propiedades similares a los plásticos tradicionales, pero con la ventaja de tener una huella de carbono más reducida y ofrecer más opciones de gestión de residuos y reciclaje. Además, no entrañan complicaciones a la hora de separarlos de otros productos orgánicos. Al final de su vida útil pueden reutilizarse, pueden reciclarse mecánicamente y, en algunos casos, pueden usarse para recuperar energía o para compost.

Los bioplásticos suelen diferenciarse en plásticos biodegradables y en provenientes de fuentes renovables, puesto que no todos los bioplásticos son biodegradables en el medioambiente. El término bioplástico abarca una amplia gama de polímeros, cada uno de los cuales presenta diferentes atributos en cuanto a su impacto sobre el medioambiente, pero no existe un único sistema de clasificación.



Actualmente, los bioplásticos todavía representan menos de un 1 % de las más de 390 millones de toneladas de plástico que se producen anualmente. Las previsiones van algo al alza: de acuerdo con los últimos datos de mercado de European Bioplastics en colaboración con Nova-Institute, la producción global de bioplásticos aumentará desde unos 2,2 millones de toneladas en 2022 hasta aproximadamente 6,3 millones de toneladas en 2027, casi el triple en un lustro.

Los bioplásticos de origen biológico pueden generarse por tres vías: a partir de polímeros, como el almidón y la celulosa, a los que se añaden plastificantes y aditivos; mediante fermentación bacteriana, por ejemplo, la polimerización química del ácido láctico producido por bacterias; o biopolímeros directamente producidos por microorganismos, como los polihidroxialcanoatos, conocidos generalmente como PHA.

15.

Retos concretos en la gestión de bioplásticos

Si queremos que los bioplásticos sean el futuro, debemos abordar su producción y gestión de manera integral. La creación de productos biodegradables solo tiene sentido si demuestran un buen comportamiento durante su uso y si se biodegradan completamente en un tiempo razonable una vez que dejamos de utilizarlos. Esta es la tarea a la que nos enfrentamos.

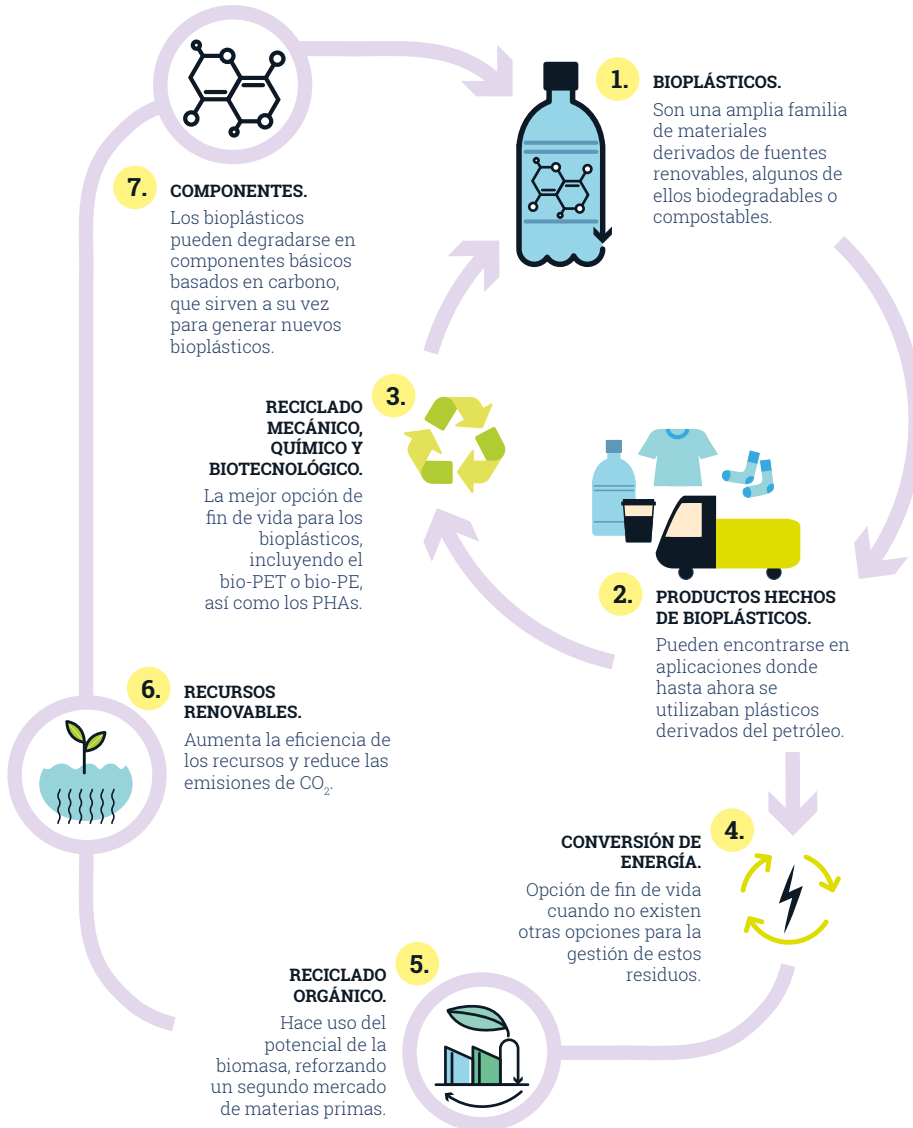
Uno de los principales hándicaps a la hora de evaluar los bioplásticos radica en que el ambiente natural en el que van a emplearse es muy variable. No se pueden realizar pruebas de mejora en condiciones de temperatura y humedad determinadas, por ejemplo. También es importante tener en cuenta si el residuo generado puede recolectarse en plantas de compostaje o si su destino final es el medioambiente natural (mar, suelo, etc.). Por ello, las estrategias de producción y de gestión han de ir de la mano.

Diseñar un plástico biodegradable que se comporte adecuadamente durante el tiempo de uso y que al final de su vida útil pueda biodegradarse en un amplio rango de condiciones es mucho más complicado que diseñarlo con condiciones restrictivas y concretas, lo cual a su vez no sería eficaz. Si un bioplástico finalmente acaba en un ambiente para el que no fue diseñado, puede no biodegradarse correctamente o no hacerlo al ritmo esperado, lo que significa que no proporcionaría los beneficios esperados frente a los plásticos convencionales.

Otro de los retos importantes es asegurar que los bioplásticos cumplan con las especificaciones requeridas para ciertas aplicaciones que buscan los consumidores, especialmente en lo que respecta a la durabilidad. Si el producto necesita tener una durabilidad determinada en diferentes condiciones durante un periodo establecido para que sea útil, resulta aún más complicado lograr que se biodegrade completamente en un tiempo determinado una vez ya no sea necesario. El equilibrio es muy difícil. Por eso, las estrategias de reciclado de bioplásticos son vitales no solo para la gestión de los residuos, sino para su implementación en el mercado.



Gráfico 1.8 Bioplásticos: cerrando el ciclo





La rápida expansión de los plásticos convencionales en las últimas décadas se debe, en gran parte, a su bajo coste. Para que los bioplásticos puedan reemplazarlos, estos han de ser competitivos, y en esta vía se están realizando investigaciones. Lo que más afecta al coste de la producción de bioplásticos producidos por fermentación es la utilización de fuentes de carbono, así que un método interesante es usar residuos para la alimentación de los microorganismos. Por ejemplo, los desechos generados por la industria alimentaria pueden ser utilizados como sustrato. Otras iniciativas exploran el uso de residuos complejos, como basura urbana o lodos, pero esto a su vez requiere de tratamiento previo.

Por último, hay que tener en cuenta que el aumento en la cuota de mercado de los plásticos con propiedades biodegradables o compostables brinda nuevas oportunidades, pero también requiere de una nueva certificación y etiquetado estandarizado para que no implique nuevos riesgos medioambientales al final de su vida útil. Hoy por hoy, no existe dicha clasificación, y es necesaria para que los usuarios tengan la información requerida sobre el modo de gestión de los residuos.

Una guía así debería indicar si son apropiados o no para los sistemas de reciclaje existentes e incluso contar, en algunos casos, con un etiquetado adicional en infraestructuras de residuos, como los contenedores, para facilitar su correcta separación. También serán necesarias evaluaciones para asegurar que el etiquetado sea efectivo para comunicar el mensaje de manera clara, con el fin de no confundir y no provocar consecuencias indeseadas. Es decir, estrategias de *marketing*.

Los requisitos para la certificación de productos plásticos biodegradables a tener en cuenta son:

1. Determinación de su biodegradabilidad.
2. Cuantificación de la velocidad de biodegradación en condiciones medioambientalmente relevantes.



3. Modelización de la persistencia en diferentes ambientes de interés.
4. Evaluación de los efectos en el medioambiente, organismos y a nivel de ecosistemas.

Por ejemplo, una de esas características, la velocidad de biodegradación, puede variar desde unas pocas semanas hasta varias décadas, dependiendo de las condiciones externas, la composición del plástico y la geometría del objeto. Por lo tanto, es crucial evaluar y certificar los productos alternativos al plástico, considerándose una variedad de escenarios posibles en los que podrían terminar los residuos.

Por el mismo motivo, sí existe legislación europea reciente para prevenir el uso de materiales que no cumplen con los requerimientos necesarios para considerarse bioplásticos. Un ejemplo es la prohibición del uso de plásticos oxodegradables por una falta de evidencia clara sobre la velocidad de degradación de los mismos en el medioambiente, y el peligro de que dichas afirmaciones falsas confundan a los consumidores.

La legislación vigente que regula el uso de plásticos y grava a las empresas por su utilización ha impulsado el aumento de alternativas comerciales a plásticos. La puesta en circulación de estos materiales «más sostenibles» requiere su certificación como compostables o biodegradables utilizando la normativa vigente (ISO 17556, ISO 14855 y EN13432). Estas normas evalúan la biodegradación, compostabilidad y ecotoxicidad en condiciones preestablecidas. Es importante resaltar que todos los componentes del material que se va evaluar deben ser biodegradables y aceptables a nivel medioambiental. Durante la biodegradación, los productos finales son CO_2 (y CH_4), agua, y en algunos casos sales minerales y biomasa microbiana. Por ello, no deberían quedar microplásticos ni productos intermedios persistentes en el medioambiente.

dos



Iniciativas para afrontar el problema

21.

**Estrategias
químicas para
una economía
circular****Plataforma temática interdisciplinar SusPlast:
iniciativa del CSIC para la gestión integral de plásticos**

Las plataformas temáticas interdisciplinares (PTI) son instrumentos de colaboración científica interdisciplinar, integradas por grupos de investigación de distintos institutos del CSIC y abiertas a la participación de empresas, administraciones y otras instituciones y agentes sociales. Constituyen un instrumento finalista y de fomento de la colaboración, capaz de agrupar diferentes iniciativas en proyectos generales de más amplio espectro para resolver retos específicos, con un claro impacto social, posibilidad de transferencia y compromiso ciudadano.

La PTI SusPlast (Sustainable Plastics Towards a Circular Economy) tiene como misión transformar los procedimientos de diseño, producción, uso y reciclado de plásticos, para dirigirlos hacia una economía circular. Para ello propone un enfoque sinérgico que involucra la ciencia de materiales y la biotecnología, con el fin de desarrollar actividades de investigación e innovación, así como estrategias socioeducativas que permitan implementar una gestión de plásticos basada en la economía circular.

Mediante la integración de sus recursos científico-técnicos, la PTI SusPlast del CSIC aborda proyectos multidisciplinares de financiación público-privada en colaboración con sus socios empresariales para el diseño y la producción de nuevos materiales plásticos sostenibles, especialmente diseñados para su reciclaje o compostaje mediante procedimientos mecánicos, químicos y biotecnológicos.

A modo de ejemplo, el sector de envases de plástico genera una gran cantidad de residuos (25,8 millones de toneladas anuales en Europa), que deben incorporarse al ciclo de vida de los plásticos para establecer las bases de la economía circular en este sector. También se abordan estrategias de revalorización de residuos urbanos e industriales para la fabricación de plásticos bio-basados o bioplásticos, y la transformación de residuos plásticos en otros compuestos y materiales de alto valor añadido.



La iniciativa pretende implementar una plataforma integral y multidisciplinar para la producción sostenible de plásticos, lo que incluye la revalorización de residuos, el reciclado y la certificación de nuevos plásticos para compostaje, fomentando a su vez el reciclaje y la revalorización. El enfoque multidisciplinar propuesto permite, a la vez, eliminar el impacto medioambiental y aprovechar los residuos para la elaboración de nuevos productos, como, por ejemplo, envases para alimentación, avanzando hacia una economía circular en este sector.

Aproximaciones de reciclado químico como complemento al reciclado mecánico: recuperación de material virgen

Varios grupos de la PTI SusPlast (Instituto de Tecnología Química, ITQ; Instituto de Carboquímica, ICB; Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CENIM; Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono, INCAR; Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros, ICTP) centran sus esfuerzos en la optimización y mejora de tecnologías de reciclado químico de diferentes polímeros, incluyendo poliestireno (PS), polimetilmetacrilato (PMMA) o polietilentereftalato (PET).

Entre las estrategias empleadas, la despolimerización mediante el uso de temperatura o pirólisis es una de las más ampliamente estudiadas. Durante esta descomposición térmica a altas temperaturas (típicamente >600 °C), las moléculas grandes se rompen en otras más pequeñas de manera similar a lo que ocurre en el craqueo del petróleo.

La pirólisis es capaz de descomponer por completo tanto los polímeros termoplásticos como los polímeros reticulados, que incluyen los termoestables y los elastómeros. De esta manera, se pueden obtener todos los componentes que conforman estos plásticos.

Al someter a pirólisis a plásticos comunes como el polietileno, el polipropileno, el polimetilmetacrilato y el poliestireno, se obtiene una mezcla compleja de productos químicos valiosos, que pueden ser de utilidad en procesos de fabricación de nuevos plásticos.



Planta piloto para la valorización mediante pirólisis de neumáticos fuera de uso. / ICB

Actualmente se están llevando a cabo varios proyectos para el reciclado químico del poliestireno, empleando una técnica de despolimerización en un reactor de lecho fluidizado. El objetivo final consiste en disponer de un líquido con un contenido en estireno, monómero principal del poliestireno, superior al 90 %.



El reactor de lecho fluidizado es el tipo de reactor óptimo para este proceso, debido a sus excelentes propiedades de transmisión de calor. Esto permite una rápida despolimerización de la materia prima, evitando reacciones de craqueo no deseadas, que podrían provocar la descomposición del monómero.

Una vez obtenido el producto líquido, se realiza un proceso posterior de purificación mediante destilación. A continuación, el producto se vuelve a polimerizar para obtener poliestireno recuperado. De esta manera, es posible obtener poliestireno reciclado de alta calidad y contribuir a la reducción de los residuos plásticos.

Otro ejemplo que conviene destacar es el reciclado químico mediante pirólisis del polimetilmetacrilato, también conocido como *PMMA*, polímero ampliamente utilizado en los sectores de la construcción y la automoción. El objetivo principal consiste en realizar la despolimerización del material mediante pirólisis en lecho fluidizado, optimizando la composición del líquido resultante. Además, se está investigando la purificación de dicho líquido mediante destilación, para obtener de nuevo *PMMA* de segunda generación.

En el proyecto también se estudian nuevas estrategias de eco-diseño, es decir, un diseño de polímeros encaminado a que su recuperación sea más sencilla una vez que hayan llegado al final de su vida útil. Esto permitiría reducir la cantidad de residuos plásticos y darles una segunda oportunidad a estos materiales.

Además del reciclaje químico de plásticos por separado, el ICB trabaja en dos problemas fundamentales que aparecen durante el reciclado químico de mezclas complejas de plásticos mediante pirólisis.

El primer desafío consiste en la eliminación de contaminantes del producto químico resultante.



Cuando se tratan mezclas de plásticos provenientes de vertederos de residuos, nos encontramos con una combinación compleja de diferentes tipos de plásticos, cada uno con sus propiedades. Además, estos plásticos pueden estar contaminados, lo que puede alterar la composición del producto líquido final resultante de la pirólisis. Por ejemplo, la presencia de metales pesados puede ser dañina para los catalizadores empleados en refinerías, lugares donde se procesan estos líquidos pirolíticos.

Para abordar este problema se desarrollan procesos de limpieza adicionales, tanto en el mismo reactor de pirólisis (procesos *in situ*) como en el producto líquido posteriormente condensado (procesos *ex situ* basados en adsorción). Además, se está trabajando en modificaciones del propio reactor de pirólisis, como la introducción estratégica de oxígeno en puntos concretos, para optimizar el proceso y mejorar la eliminación de contaminantes.

El segundo desafío consiste en lograr la escalabilidad del proceso para poder tratar grandes volúmenes de residuos plásticos.

En el ITQ y en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM), se realizan investigaciones sobre una variante de pirólisis que hace uso de catalizadores. Las investigaciones del ITQ se centran en encontrar formas eficientes y rentables de reciclar y valorizar plásticos y compuestos actualmente no reciclables. El proceso investigado combina tecnologías de pirólisis, tratamiento catalítico y separación por membranas para obtener productos químicos de alto valor añadido, que pueden ser utilizados para la producción de polímeros de calidad virgen o como materia prima en otros procesos industriales. Para asegurar la eficiencia y sostenibilidad del proceso, se aplican técnicas de control avanzadas. Se emplean indicadores significativos basados en análisis del ciclo de vida (LCA) y costes del ciclo de vida (LCC). Además, se recuperarán las corrientes secundarias ricas en hidrocarburos para su valorización energética mediante la combustión integrada con captura de CO₂.

Por otro lado, el ICMM investiga en el diseño y preparación de catalizadores heterogéneos, basados en polímeros porosos o materiales reticulados «a medida». Estos catalizadores tienen aplicaciones en la preparación de nuevos plásticos y biomateriales de interés.

Como alternativa a los procesos de pirólisis, la solvólisis permite la despolimerización de polímeros gracias a disolventes. Aunque casi todos los polímeros se pueden someter a pirólisis, los compuestos recuperados no siempre son adecuados para fabricar productos de valor similar. Por ejemplo, los poliuretanos y los poliésteres son difíciles de descomponer mediante pirólisis en moléculas pequeñas útiles, pero los grupos funcionales de uretano y éster presentes son susceptibles a reacciones con nucleófilos como el agua o el metanol. Esto permite despolimerizarlos en compuestos adecuados para ser polimerizados de nuevo.

Esta estrategia, investigada en el ICTP, es adecuada para cualquier polímero que presente grupos funcionales hidrolizables formando parte de su esqueleto. La aplicación más exitosa de la despolimerización asistida por solventes es la hidrólisis o alcoholisis del polietiléntereftalato (PET), un termoplástico muy común y ampliamente utilizado, tal como se mencionó previamente.

Ecodiseño macromolecular: estrategias para la preparación de polímeros más fácilmente reciclables

Los envases de plástico constituyen una gran parte de los residuos plásticos que generamos. Como hemos comentado antes, estos envases se han vuelto altamente complejos y han sido diseñados para satisfacer, de la manera más económica posible, las propiedades exigidas por el cliente. Un ejemplo claro de esta situación son los envases multicapa ampliamente utilizados para la conservación de alimentos que, sin embargo, constituyen un reto para el proceso de reciclado.

Estos envases se componen de diferentes materiales en forma de estructuras multicapa, para mejorar propiedades como la de barrera a gases, a vapores o a la luz, o para adaptar las propieda-



des mecánicas a los requerimientos concretos de cada aplicación. En ocasiones incluso se les aplican recubrimientos metálicos o inorgánicos. El ejemplo más común es el tetrabrik utilizado para leche, que combina polietilenos, cartón y aluminio.

Esta complejidad en la estructura de los envases plásticos dificulta su reciclaje y reutilización.

Distintos grupos de investigación, pertenecientes a la PTI SusPlast (Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, IATA; Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, ICP; Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, ICMS; Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona, ICMAB; ICTP), trabajan en el desarrollo de envases que sean más fácilmente reciclables y que presenten propiedades mejoradas. Para lograrlo, se están utilizando diversas estrategias:

- Diseño de envases monomaterial con propiedades similares a las que tendrían los envases multimaterial.
- Investigación en adhesivos especiales para su uso en envases multimaterial que faciliten la separación de los distintos componentes del envase durante el proceso de reciclaje.
- Uso de materiales biodegradables: PLA, celulosa bacteriana, biopolímeros obtenidos a partir de fuentes naturales (celulosa, lignina, etc.), subproductos agroalimentarios o componentes extraídos de los mismos para la elaboración de envases más sostenibles.
- Propiedades especiales: incorporación de propiedades antibacterianas, antioxidantes o antivaho en los envases; utilizando aditivos derivados de recursos orgánicos; o aplicando tratamientos superficiales (estrategias químicas, plasma, etc.).



Máquina universal de ensayos mecánicos para la caracterización de materiales poliméricos.

/ PTI SUSPLAST, ICTP



Otra estrategia dentro del ecodiseño consiste en utilizar estrategias de polimerización con el fin de obtener polímeros más fácilmente reciclables o utilizando alternativas de polimerización más sostenibles (Centro de Investigaciones Biológicas Margarita Salas, CIB; ICP, ICTP, e ICMAB). En este sentido, se trabaja conjuntamente para la producción de polímeros con grupos químicos terminales que pueden ser despolimerizados en condiciones menos agresivas que las utilizadas en los métodos actuales de reciclado químico, tales como pirólisis o solvólisis. Esto permitirá reducir el coste del proceso de reciclado, aumentando simultáneamente el rendimiento del proceso y haciendo de este tipo de reciclado una alternativa interesante a nivel energético. Junto con el diseño químico del polímero, se está investigando en la optimización de la elección de las condiciones de polimerización, incluyendo disolvente y proponiendo alternativas como el CO₂ supercrítico para llevar a cabo la polimerización de una manera más sostenible.

Por último, dentro de las líneas temáticas de la PTI, se aborda la posibilidad de sustituir materiales termoestables por alternativas que se puedan reciclar más fácilmente. Los materiales termoestables están diseñados para resistir las condiciones extremas durante su uso, como rozamiento mecánico constante o



altas temperaturas. Sin embargo, esto plantea un desafío al final de su vida útil, ya que en la mayoría de los casos no se pueden reciclar fácilmente. Un alto porcentaje de estos materiales terminan en vertederos o se someten a incineración.

El ICTP y el CENIM trabajan en el desarrollo de materiales que mejoren esta situación. Una estrategia consiste en crear sistemas capaces de autorrepararse, que permitan alargar el máximo la vida útil de los elementos fabricados con estos materiales. Además, se investiga en materiales que se comporten como termoestables a temperatura ambiente, pero que sean reprocesables a alta temperatura. Esto combinaría características de materiales termoplásticos (reciclables) y de materiales termoestables. Dichos avances permiten explorar materiales compuestos alternativos, que puedan reemplazar a los termoestables en aplicaciones específicas.

Es relevante destacar que la PTI SusPlast cuenta con una planta piloto con la infraestructura necesaria para llevar a cabo la síntesis, procesado, caracterización y creación de prototipos de plásticos sostenibles, lo que permite avanzar en el desarrollo de los proyectos anteriormente mencionados.

22.

Procesos y aproximaciones biotecnológicas

Ecodiseño, síntesis y degradación de bioplásticos

En el CIB se están abordando proyectos de producción de bioplásticos mediante herramientas biotecnológicas que implican el uso de enzimas y microorganismos.

Como se ha tratado anteriormente, los bioplásticos se obtienen a partir de recursos renovables, mediante procesos de fermentación. Pueden biodegradarse en entornos abiertos o revalorizarse en sistemas de compostaje doméstico e industrial. Por todo ello, constituyen una alternativa a los plásticos tradicionales, ya que presentan propiedades similares y ofrecen ventajas adicionales en comparación con los materiales petroquímicos.

Una de las estrategias más prometedoras consiste en la producción de poliésteres bacterianos, como los polihidroxialcanoatos (PHA), obtenidos mediante fermentación bacteriana. Para ello, en el marco de la PTI SusPlast, se ha puesto en marcha una planta piloto de bioprocesos en el CIB. En esta planta se cultivan microorganismos productores, tanto naturales como optimizados genéticamente. Además, se producen catalizadores enzimáticos implicados en la producción, diversificación y degradación de materiales plásticos.

Revalorización de residuos para la producción de bioplásticos en procesos microbianos

Uno de los aspectos más relevantes del proceso, desde el punto de vista de la sostenibilidad, es la posible revalorización de residuos de diferente complejidad y composición haciendo uso de la fermentación bacteriana.

Un ejemplo de las actividades de este tipo, que se están llevando a cabo en el CIB, el ICP, la Estación Experimental del Zaidín (EEZ) y el Centro Nacional de Biotecnología (CNB), es la revalorización de residuos recalcitrantes, como los compuestos aromáticos presentes en los plásticos derivados de la industria petroquímica como el PET.



Cultivo en biorreactor de bacterias productoras de bioplástico. / CIB

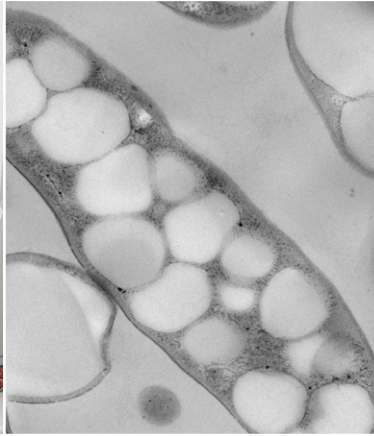
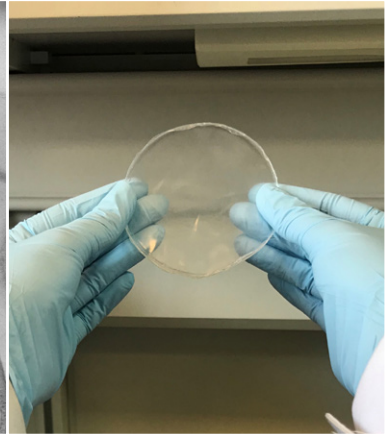


Imagen capturada mediante microscopía electrónica de bacterias con capacidad de generar y almacenar bioplásticos. / CIB



Bioplástico obtenido tras su extracción a partir de bacterias acumuladoras de PHA. / CIB

El objetivo es generar bioplásticos personalizados, con composición y propiedades definidas, empleando estrategias de ingeniería metabólica y biología sintética. Esto conlleva la optimización de los microorganismos productores o el diseño de consorcios microbianos.

Otras acciones incluyen el estudio de la utilización de ácidos grasos volátiles como materia prima, los cuales se pueden obtener mediante fermentación anaerobia de algunos residuos ricos en materia orgánica, como los derivados de plantas de tratamiento de aguas, o de explotaciones ganaderas. Estos ácidos se pueden utilizar para alimentar diferentes bacterias productoras de bioplásticos como *Cupriavidus necator* o *Pseudomonas putida*.

Otros proyectos están enfocados en la utilización de corrientes gaseosas, como el gas de síntesis producido por gasificación/pirólisis de residuos complejos, o incluso el CO_2 , como precursores de bioplásticos. El CO_2 es el principal gas causante del calentamiento global y una de las más abundantes fuentes de carbono disponibles en el planeta.

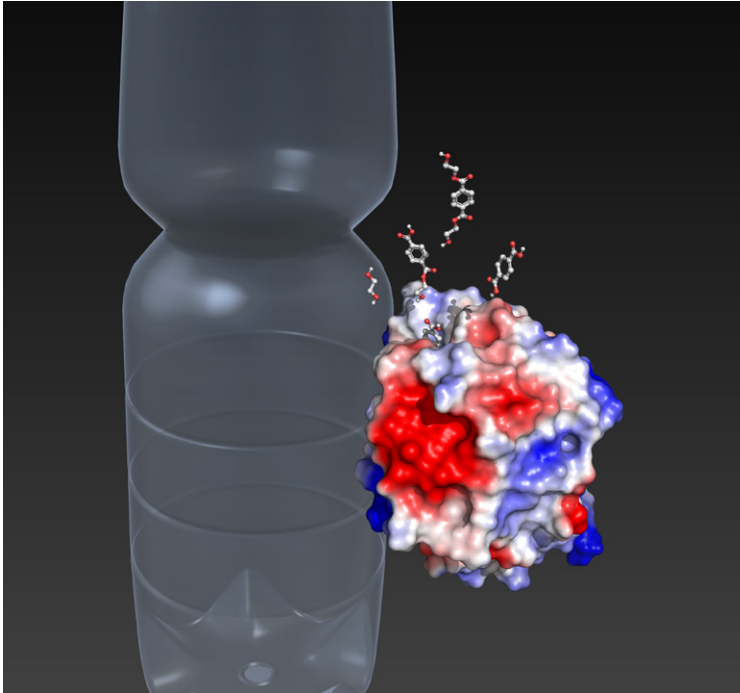
Para lograr todo esto, es fundamental la optimización de los microorganismos productores mediante ingeniería metabólica. Esto implica el desarrollo y aplicación de métodos computacionales de biología de sistemas para optimizar los procesos biotecnológicos mediante rediseño del metabolismo microbiano a nivel individual o en consorcios, así como de nuevas herramientas de biología sintética.

En el CNB, EEZ y el CIB también se están llevando a cabo proyectos relacionados con la bioproducción de nuevos monómeros para la síntesis de bioplásticos a partir de residuos (por ejemplo, lignocelulósicos). En estos proyectos se pretende lograr una producción sostenible, en bacterias u hongos, de intermediarios metabólicos o *building blocks*. Estos intermediarios son transformados en monómeros y, posteriormente, son utilizados en la síntesis química de distintos polímeros biobasados.

Aplicación de biocatalizadores enzimáticos para la degradación y el ecodiseño de plásticos sostenibles

En el ICP y en el CIB se lleva a cabo el análisis *in silico* de genomas y bases de datos. Esto incluye la «resurrección» de enzimas ancestrales, para la búsqueda de enzimas con actividades catalíticas de potencial interés. Estos proyectos conllevan la optimización o ingeniería de estas enzimas empleando técnicas como la evolución dirigida, el diseño racional y el diseño computacional.

Estas estrategias están siendo desarrolladas en una estación de evolución dirigida, establecida en la PTI SusPlast, que permite personalizar y optimizar catalizadores enzimáticos. Para ello, se hace uso de un porfolio de enzimas hidrolasas y oxidorreductasas recombinantes desarrolladas con anterioridad, así como de técnicas de generación de diversidad genética para la construcción de genotecas de mutantes. Se desarrollan protocolos customizados para la exploración de alto rendimiento (*high-throughput screening*) de las librerías de enzimas, con el fin de cribar y seleccionar aquellas que sean más adecuadas para cada objetivo específico.



Modelo en el que se simula la degradación de PET por una enzima PTEasa. / ISABEL PARDO MENDOZA (CIB)

Así, las variantes de enzimas más eficientes para cada propósito se producen en biorreactores, se caracterizan bioquímicamente, y se ensayan como biocatalizadores para la degradación y la producción de precursores o plásticos.

Además, se están diseñando enzimas extremófilas para la obtención de componentes biobasados en espumas de poliuretano (PU) a partir de ligninas industriales. Mediante técnicas de evolución dirigida, se desarrollan enzimas oxidasas capaces de actuar en las condiciones de elevada temperatura y pH alcalino, típicas del proceso industrial de producción de pasta de celulosa *kraft* a partir de madera. El objetivo es valorizar las ligninas *kraft*, liberadas como subproductos en las corrientes laterales de las fábricas, mediante su tratamiento enzimático, para utilizarlas como componentes biobasados en espumas de poliuretano, en lugar de componentes derivados de fuentes fósiles.

Otros proyectos se centran en la transformación de residuos de la industria alimentaria en precursores del ácido láctico, que posteriormente pueden emplearse como precursores del PLA, un bioplástico. Este proceso conlleva dos etapas: i) la obtención de ácido láctico mediante fermentación láctica, y ii) la polimerización enzimática de este ácido. Para ello se están ensayando diferentes hidrolasas fúngicas nativas y diseñadas en el laboratorio (tanto libres como inmovilizadas) para la síntesis de cadenas cortas de este bioplástico. Por último, en el CIB e ICP se están abordando actividades relacionadas con la degradación enzimática de bioplásticos bacterianos con el fin de favorecer estrategias circulares de reciclado.

En el Instituto de Biología Integrativa de Sistemas (I2SYSBIO) y en el CIB, se está trabajando en proyectos pioneros que se centran en la investigación sobre la degradación de plásticos (polietileno, poliestireno, polipropileno) utilizando otros organismos biológicos, específicamente insectos y el gusano de la cera, así como los catalizadores enzimáticos que estos o sus microbios producen.

Por último, un aspecto muy importante desde el punto de vista del abordaje de la contaminación plástica consiste no solo en la degradación de los plásticos, sino de los aditivos que se utilizan en su fabricación. El objetivo principal de esta actividad, realizada desde el CIB, es desarrollar nuevos biocatalizadores para la degradación eficiente de aditivos, incluyendo compuestos plastificantes tales como los ésteres de ftalatos. Dichos ésteres están presentes en diversos residuos plásticos y constituyen importantes tóxicos medioambientales (disruptores endocrinos). Para lograr este objetivo, se realiza una búsqueda y aislamiento de esterasas capaces de hidrolizar eficientemente los ésteres de ftalatos, empleando técnicas de aislamiento de nuevas cepas, *screening* de metagenomas o ingeniería/evolución de esterasas conocidas, etc. Otras investigaciones buscan la revalorización de los aditivos hacia la síntesis de PHA.



Investigador trabajando con un biorreactor. / cis

23.

Efectos de la contaminación por plásticos en el medioambiente y en la salud humana

La magnitud del problema: herramientas de observación/detección

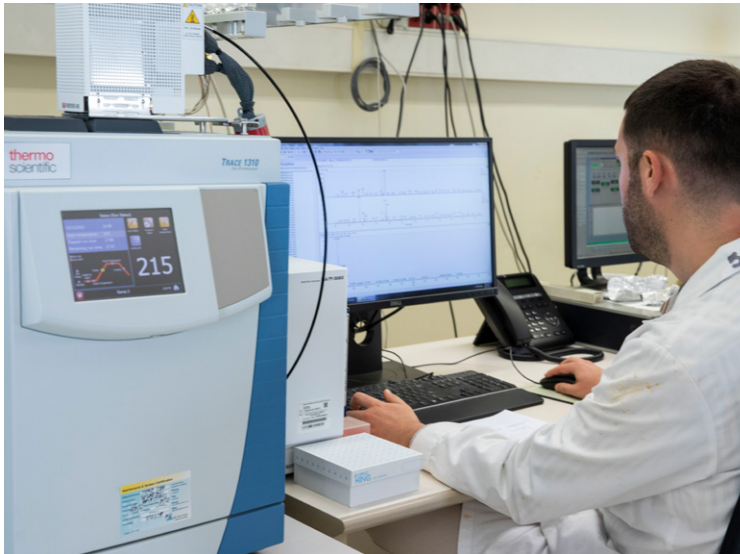
Con el fin de desarrollar soluciones a largo plazo que reduzcan la contaminación por plásticos, tan importante como elaborar estrategias técnicas es también establecer metodologías estandarizadas para evaluar con rigurosidad tanto la magnitud de la contaminación como su impacto social y en el medioambiente.

Desde el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) y el IATA, se están desarrollando metodologías analíticas reproducibles para el análisis de nano- (NP), micro- (MP) y macroplásticos, así como de aditivos plásticos, en diferentes matrices (aire, agua, sedimentos, alimentos y animales).

Para ello se desarrollan técnicas de análisis basadas en espectroscopía (análisis de la luz que absorbe, despiende o dispersa un objeto) infrarroja (μ -FTIR), espectroscopía Raman y técnicas cromatográficas (separación de los distintos elementos de mezclas complejas) (py-GC-MS) para monitorizar los plásticos en diferentes etapas del ciclo del agua: aguas de captación, aguas en tratamiento potabilizador y aguas de distribución; garantizando así la seguridad del agua de abastecimiento.

Asimismo, se lleva a cabo la monitorización de la contaminación en ríos y aguas costeras. La evaluación de la presencia de microplásticos en aguas, alimentos y aire permitirá estimar la ingesta diaria y los efectos que los distintos polímeros plásticos y aditivos pueden tener sobre la salud humana, algo que todavía está en cuestión. Los microplásticos que se encuentran en el mar son principalmente partículas fragmentadas por el sol y las corrientes, y por ello su cuantificación es compleja.

En el Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información Leonardo Torres Quevedo (ITEFI) y en el Instituto de Ciencias del Mar (ICM) se trabaja en la mejora de su detección mediante una nueva metodología basada en el uso de ultrasonidos para la separación y concentración de microplásticos. A nivel de muestreo, los microplásticos se cuantifican mensualmente en la costa de Barcelona, y se observan las tendencias de las microfibras en



Laboratorio de Espectrometría de Masas (IDAEA) para la detección de aditivos plásticos en diversos tipos de muestras. / IDAEA

una serie histórica en la bahía de Blanes. A nivel experimental, se están realizando estudios para observar el destino final de los microplásticos en función de las partículas orgánicas del medio. Asimismo, se investiga cuáles son los compuestos químicos que liberan al mar y su efecto, tanto en el ciclo del carbono como en los microorganismos. Adicionalmente, se estudian las diferentes colonizaciones de microorganismos en las partículas de microplásticos convencionales y biodegradables.

En el ICM se aborda también el problema de los plásticos en el océano desde diferentes perspectivas. Una de ellas es la detección y cuantificación de los macroplásticos, que, por su visibilidad, crean una importante alarma social. Se trabaja en el desarrollo de métodos de detección espectral de áreas con concentraciones significativas de macroplásticos flotantes en regiones costeras. Esto se logra mediante el uso de satélites equipados con sensores ópticos de media y alta resolución. Asimismo, se caracteriza, cuantifica y mapea el plástico recogido por pesqueros de arrastre en sus caladeros de la costa catalana, a profundidades de entre 20 m y 800 m.

Impacto en salud ambiental: medio acuático y océanos

Los métodos de cuantificación y análisis son importantes para medir el impacto en el medioambiente de los plásticos.

Durante muchos años, los científicos del IDAEA se han dedicado a estudiar los efectos de la contaminación plástica en los ecosistemas acuáticos, con el objetivo de analizar la toxicidad de los aditivos plásticos y los microplásticos en organismos acuáticos y modelos celulares. Investigan, además, las fuentes, transporte y destino de partículas plásticas y aditivos en el medio acuático, y su presencia en diversas matrices ambientales, como el aire, los organismos y los lodos de las depuradoras.

Todos estos estudios contribuirán a mejorar las estrategias de gestión de residuos y a fomentar el desarrollo de materiales más respetuosos con el medioambiente. El objetivo es reducir la contaminación plástica y encontrar alternativas sostenibles que nos permitan cuidar nuestros ecosistemas acuáticos.



Investigadora observando un cultivo celular para evaluar el impacto de los plásticos en la salud humana y medioambiente. / IDAEA



Además de estudiar los efectos de la contaminación plástica en los organismos y ecosistemas acuáticos, varios otros institutos del CSIC, como el IDAEA, el ICM y el Instituto de Investigación en Ciencias de la Alimentación (CIAL), entre otros, investigan también la toxicidad de los plásticos en especies centinela y modelos celulares.

Se han desarrollado estudios empleando células humanas y de peces para evaluar la toxicidad de aditivos plásticos, como los ftalatos y el bisfenol A. Estos estudios han demostrado que la exposición a algunos aditivos plásticos puede tener efectos nocivos sobre la viabilidad celular, causar estrés oxidativo e incluso conllevar alteraciones endocrinas.

Mediante técnicas de lipidómica, que permiten el análisis completo de las especies de lípidos en muestras biológicas, se han analizado los cambios en los perfiles lipídicos, inducidos por la exposición a plásticos y aditivos. Tanto la exposición a micro- y nanoplásticos como a aditivos produce una acumulación significativa de ciertas especies de lípidos (por ejemplo, triglicéridos) y la disminución de otras (por ejemplo, lípidos poliinsaturados). Aunque se desconoce de qué manera estos cambios afectan al funcionamiento y metabolismo celular, estos estudios permiten comprender los mecanismos subyacentes a la toxicidad causada por plásticos.

Otros estudios realizados en el ICM incluyen la investigación de nuevas rutas de biodegradación del plástico marino a través de los lixiviados de plástico y su interacción con los microorganismos. Los microorganismos no solo representan un organismo susceptible a los efectos de los plásticos, sino una potencial herramienta para su degradación. En ese sentido, se están buscando genes bacterianos que proporcionen la capacidad de degradar plásticos como el PET, para así diseñar enzimas con un rendimiento mejorado para su uso en aplicaciones biotecnológicas.



Adicionalmente, varios institutos del CSIC (IDAEA, ICM e IATA, entre otros) colaboran con otras instituciones de investigación y grupos interesados para crear conciencia sobre los riesgos ambientales y sanitarios asociados a la contaminación plástica, así como para promover prácticas sostenibles. Su labor es crucial para proporcionar soluciones basadas en la evidencia para abordar el urgente problema mundial de la contaminación plástica.

Impacto en salud humana

También hay que cuantificar el impacto de los plásticos en la salud humana. Se ha encontrado evidencia que sugiere una vinculación entre exposición a aditivos plásticos y efectos adversos en nuestro organismo. Algunos de estos aditivos se han clasificado como disruptores endocrinos, obesogénicos (que favorecen el desarrollo de la obesidad) e incluso genotóxicos (que pueden causar mutaciones cancerígenas).

Aunque hay menos estudios disponibles acerca de la toxicidad de las partículas plásticas (MP/NP), se han detectado en distintos órganos (hígado, bazo, riñón, cerebro, intestino y placenta), después de su administración oral o intravenosa en animales de experimentación. Estas partículas, de tamaños que van desde 40 nm a 50 μm , han inducido alteraciones intestinales, alteraciones del sistema inmune y problemas en la calidad del esperma, entre otros.

Las partículas de plástico han demostrado, en modelos celulares, ser capaces de inducir apoptosis (muerte celular programada), inflamación, estrés oxidativo y respuestas inmunológicas. Estos



efectos podrían contribuir al desarrollo de enfermedades como el cáncer y trastornos metabólicos. Sin embargo, estos efectos se han descrito a concentraciones elevadas de partículas plásticas y actualmente no se dispone de datos fiables sobre los niveles de partículas plásticas a los que realmente estamos expuestos.

Estudios recientes muestran, además, que la exposición a partículas plásticas tiene un impacto negativo en nuestra microbiota intestinal, ocasionando disbiosis intestinal, alterando funciones metabólicas y generando un entorno inflamatorio en el intestino, cuyas consecuencias a largo plazo aún se desconocen. Ciertas nanopartículas de plástico, como las de poliestireno, pueden atravesar la barrera gastrointestinal *in vitro*, tanto en modelos humanos como en organismos acuáticos. El CIAL realiza una investigación pionera en este campo, pues dispone de un modelo de intestino artificial para estudiar cómo diferentes tipos y tamaños de partículas afectan al microbioma intestinal. Se espera que la combinación de estudios de microbioma y los avances en biotecnología nos permitan comprender mejor cómo las partículas plásticas afectan a la diversidad de microorganismos intestinales y sistemas enzimáticos.

Otras investigaciones se enfocan en conocer los posibles efectos de estas partículas plásticas en patologías como la alergia alimentaria, donde podrían influir sobre la digestibilidad de los alérgenos alimentarios, aumentar la permeabilidad intestinal y promover la inflamación intestinal, lo cual podría contribuir a la sensibilización a los alérgenos alimentarios.

2.4.

Contribución en la regulación y certificación de materiales poliméricos más sostenibles



Reactores para ensayos de biodegradación en medio compost/ SUELO. / UNIDAD DE BIODEGRADABILIDAD Y COMPOSTABILIDAD, PTI SUSPLAST, IATA

COMO ya hemos visto, el aumento de la cuota de mercado de los plásticos con propiedades biodegradables o compostables brinda nuevas oportunidades, pero también plantea nuevos riesgos medioambientales debido a la falta de una certificación y etiquetado estandarizado que permita una adecuada gestión de residuos. De hecho, los plásticos biodegradables se consideran cada vez más como una alternativa a los plásticos convencionales no biodegradables, para aplicaciones específicas en ambientes abiertos, como parte de una amplia estrategia de mitigación de daños producidos por contaminación plástica.

Es necesaria una correcta clasificación y estandarización de los nuevos materiales que salen al mercado, así como el establecimiento de un sistema de gestión de sus residuos. Es importante resaltar que, en este sentido, es imprescindible la colaboración entre el sector industrial, que desarrolla estos nuevos materiales, y el sector científico, que investiga cómo se degradan y cuál es su posible impacto en el medioambiente. Dicha colaboración es fundamental para garantizar que los materiales sean sostenibles e inocuos antes de ser lanzados al mercado.

Desde la PTI SusPlast del CSIC se estableció la importancia de participar en los procesos de certificación y estandarización de nuevos bioplásticos. Siendo conscientes de los múltiples retos y necesidades en este sector, se ha puesto en marcha una planta acreditada para certificar la compostabilidad y biodegradabilidad de estos materiales, en el IATA. Esta planta tiene dos objetivos fundamentales:

- i. Dar servicio a grupos de investigación y empresas que trabajan en el desarrollo de nuevos bioplásticos, certificando la biodegradabilidad o compostabilidad de dichos materiales.
- ii. Contribuir de manera activa a la revisión de los protocolos existentes para la certificación de bioplásticos, estableciendo criterios claros para su gestión y asegurando su inocuidad.



Sistema de medición gravimétrica del ensayo de biodegradación. / UNIDAD DE BIODEGRADABILIDAD Y COMPOSTABILIDAD, PTI SUSPLAST, IATA

Este último punto es de vital importancia, ya que la normativa existente para la caracterización de la ecotoxicidad de los bioplásticos data del año 2001 y únicamente evalúa la ecotoxicidad en plantas superiores (monocotiledóneas y dicotiledóneas), sin considerar el efecto de los lixiviados sobre otros organismos terrestres o acuáticos.

En un reciente estudio de colaboración entre el IDAEA y el IATA, se evaluó la toxicidad de extractos metanólicos obtenidos de diferentes bolsas de bioplásticos comerciales, antes y después de someterlos a un proceso de compostaje. Los resultados se compararon con los procedentes de estudios con bolsas de plástico convencional y reciclado. Estos estudios revelaron una toxicidad significativa de las bolsas de bioplásticos, que aumentó aún más después de los procesos de fotodegradación o compostaje. Por el contrario, las bolsas de plástico convencional no mostraron esta toxicidad destacable.

Por lo tanto, resulta urgente actualizar la normativa relativa a la certificación de bioplásticos en términos de toxicidad, para garantizar la inocuidad de estos nuevos materiales antes de su comercialización.

tres



Conclusiones y recomendaciones

|||||

Uno de los aspectos claves, junto con la disminución del consumo de plástico en aplicaciones donde realmente no es necesario, es la mejora en el tratamiento de residuos, tanto en la recogida como en el reciclaje. En este sentido, la exploración y aumento de infraestructuras de tratamiento, así como de capacidades de reciclaje tanto mecánico como químico, pueden mejorar significativamente la situación actual.

|||||

La investigación en procesos químicos y biotecnológicos para la gestión sostenible de residuos plásticos y la producción de materiales alternativos más respetuosos con el medioambiente es muy incipiente a la vez que prometedora, por lo que se requiere inversión económica en esta área, incluyendo la formación y capacitación de personal especializado.

|||||

Para el establecimiento de estándares de caracterización y certificación de nuevos y ya existentes polímeros potencialmente compostables, es necesaria la evaluación de la probabilidad de que dichos productos acaben en ambientes inadecuados, al igual que del riesgo potencial que supone que no se degraden en dichas condiciones. Asimismo, es necesaria la actualización de la normativa relativa a la caracterización de la toxicidad de los nuevos materiales, para garantizar la inocuidad de los mismos antes y después de los procesos de compostaje.

|||||

Concretamente, en futuros estudios es importante considerar las condiciones reales de exposición, incluyendo una gama completa de formas, tamaños y composición polimérica. También debemos abordar una serie de desafíos, tales como la realización de experimentos de exposición crónica, estimación de la exposición diaria a plásticos en poblaciones humanas e identificación de grupos con baja y alta exposición. Además, es necesario el desarrollo de herramientas analíticas más sofisticadas que permitan medir con más precisión las características y concentraciones de MP/NP en el medioambiente, biota y tejidos humanos, con el fin de poder tomar medidas para proteger nuestra salud y entorno.

|||||

Durante el diseño del protocolo de biodegradabilidad de los distintos productos a evaluar, es importante considerar dónde serán estos utilizados antes de lanzarlos al mercado.

|||||

La evaluación y certificación de los nuevos materiales debe ir acompañada del correspondiente etiquetado, indicando el potencial de biodegradabilidad y el modo en el que deben desecharse. Si deben desecharse en una instalación ya existente para residuos, como por ejemplo contenedores de basura, esta deberá asimismo etiquetarse para minimizar la contaminación cruzada.

cuatro



Listado de centros

|||||

CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Centro de Investigaciones Biológicas Margarita Salas (CIB, CSIC)	www.cib.csic.es/es	direccion.cib@csic.es
Centro Nacional de Biotecnología (CNB, CSIC)	www.cnb.csic.es/index.php/es/	direccion.cnb@csic.es
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM, CSIC)	www.cenim.csic.es/	info@cenim.csic.es
Estación Experimental del Zaidín (EEZ, CSIC)	www.eez.csic.es/	direccion.eez@csic.es
Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (IATA, CSIC)	www.iata.csic.es/es	info@iata.csic.es
Instituto de Biología Integrativa de Sistemas (I2SysBio, CSIC-UV)	www.uv.es/i2sysbio	iu.i2sysbio@uv.es
Instituto de Carboquímica (ICB, CSIC)	www.icb.csic.es/	direccion.icb@csic.es
Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (ICP, CSIC)	https://icp.csic.es/es/	info@icp.csic.es
Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB, CSIC)	www.icmab.es/	info@icmab.es
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM, CSIC)	www.icmm.csic.es/es/	info@icmm.csic.es
Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (ICMS, CSIC-US)	www.icms.us-csic.es/	buzon@icmse.csic.es
Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP, CSIC)	www.ictp.csic.es/ICTP2/	director@ictp.csic.es
Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR, CSIC)	www.incar.csic.es/	contacto@incar.csic.es
Instituto de Ciencias del Mar (ICM, CSIC)	www.icm.csic.es/es	secredir@icm.csic.es
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA, CSIC)	www.idaea.csic.es/	gerencia.idaea@csic.es



CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Instituto de Investigación en Ciencias de la Alimentación (CIAL, CSIC-UAM)	www.cial.uam-csic.es/	direccion.cial@csic.es
Instituto de Tecnología Química (ITQ, CSIC-UPV)	https://itq.upv-csic.es/	itq@itq.upv.es
Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información Leonardo Torres Quevedo (ITEFI, CSIC)	www.itefi.csic.es/es	direccion.itefi@csic.es
Plataforma Temática Interdisciplinar (PTI+) SusPlast	https://pti-susplast.csic.es/	comunicacionsusplast@csic.es



Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



SCIENCE  POLICY