



CAPÍTULO 02

REINVENTANDO LA SOSTENIBILIDAD EN ENVASES Y EMPAQUES:

un análisis integral de plásticos
(polietileno y polipropileno)
y su impacto en un futuro circular.



taxia
mentoría



INCYCLO
ASESORAMIENTO AMBIENTAL &
SOLUCIONES OPERATIVAS



UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA
1803



Autores:

Kaory Barrientos

Ingeniera biomedica, MSc

Marybel Montoya

Biotechnóloga, MSc

Maria Isabel Gaviria

PhD, Investigadora

Johana Andrea Gutierrez

MSc, investigadora

Grupo de investigación:

Taxia mentoría SAS- Incyclo SAS

Proyecto Alianza Circular

Universidad de Antioquia

Diseño y diagramación

Camilo Escobar Gaviria

Corrector de estilos

Jaime David Pinilla Gutiérrez



CONZIDO TENET



| | |
|--|----|
| 1. Resumen..... | 4 |
| 2. Introducción..... | 6 |
| 3. Contaminación por plásticos: una mirada hacia el impacto ecológico del polietileno 4. y polipropileno..... | 10 |
| 4. Plásticos en números..... | 16 |
| 5. Análisis ciclo de vida: optimizando la sostenibilidad de los envases de polietileno y polipropileno en la industria | 20 |
| 6. La última etapa del ciclo de los plásticos: la disposición final de los residuos de PE y PP..... | 24 |
| 6.1. Reciclaje..... | 26 |
| 6.1.1. Reciclaje mecánico..... | 29 |
| 6.1.1.1. Proceso de reciclaje mecánico..... | 31 |
| 6.1.2. Reciclaje químico | 35 |
| 6.1.3. Reciclaje térmico..... | 38 |
| 6.1.3.1. Pirólisis..... | 38 |
| 6.1.3.2. Gasificación..... | 40 |
| 6.1.3.3. Hidrocraqueo | 40 |
| 6.2. Incineración..... | 41 |
| 6.3. Otros sistemas de gestión de residuos plásticos: sistemas enzimáticos..... | 42 |
| 7. Diseño de empaques sostenibles | 44 |
| 8. Explorando los bioplásticos: un viaje hacia la sostenibilidad..... | 46 |
| 9. Casos de éxito..... | 51 |
| 9.1. Newcycling..... | 52 |
| 9.2. Repensando el empaquetado de plástico..... | 53 |
| 9.3. Walmart: “Menos plástico. Mejor plástico. Sin plástico”..... | 54 |
| 9.4. Un diseño de botella de bebida reutilizable para múltiples marcas: botella universal..... | 55 |
| 9.5. Enka: transformación e innovación..... | 57 |
| 10. Conclusiones..... | 58 |
| 11. Bibliografía..... | 61 |



1. RESUMEN

En este capítulo se abordan los desafíos ambientales derivados del uso extensivo de **polietileno (PE) y polipropileno (PP)**, dos polímeros de amplio consumo y proyecciones crecientes, especialmente en la fabricación de envases y empaques para la industria alimentaria; así como las perspectivas tecnológicas para abordar los residuos que surgen a partir de su consumo. **Estos materiales contribuyen significativamente a la acumulación de residuos sólidos debido a su baja reciclabilidad y su descarte inmediato tras su uso**, lo cual junto a la creciente demanda de plástico —cuadruplicada en las últimas tres décadas— ha

derivado en **la acumulación de aproximadamente 30 millones de toneladas de residuos plásticos en los océanos**, y en la actualidad, solo un **9% total de plásticos está siendo reciclado**, mientras que el **69% se gestiona a través de rellenos sanitarios e incineración, y el 22% se libera al ambiente**. A pesar de los esfuerzos de diversas regiones, como la Unión Europea, América Latina, Canadá, EE. UU. y China para transitar hacia un modelo de economía circular, las tasas de reciclaje siguen siendo muy bajas. Esto subraya la urgente necesidad de implementar medidas efectivas de circularidad para abordar esta problemática.

Las tecnologías de reciclaje de plásticos son fundamentales para combatir la contaminación y avanzar hacia una economía circular. El reciclaje mecánico es adecuado para residuos homogéneos, y produce plásticos para aplicaciones de menor exigencia. En contraste está el reciclaje terciario, el cual, aunque descompone plásticos en monómeros, facilitando la fabricación de productos de alto valor, tiene un costo que limita su adopción. Por otro lado, están las tecnologías de reciclaje basadas en sistemas biológicos, las cuales, aunque presentan desafíos técnicos, están siendo desarrolladas por la comunidad científica. De cualquier modo, **es esencial que el desarrollo de nuevas tecnologías considere factores sociales y económicos para garantizar viabilidad a gran escala, reducir la dependencia de materiales vírgenes y derivados del petróleo o fuentes no renovables y avanzar hacia una economía más circular.**

Además, se enfatiza la importancia del **Análisis del Ciclo de Vida (LCA Por sus siglas en Inglés) como herramienta crucial para identificar oportunidades de mejora ambiental, proporcionar información para la toma de decisiones en la industria y el gobierno,** seleccionar indicadores de desempeño ambiental que implica la reducción de emisiones y una gestión eficiente de recursos; y se aborda el **diseño de envases sostenibles, o ecodiseño, como una solución esencial para abordar los desafíos ambientales en la industria de envasado, considerando aspectos que van desde la selección de materiales, como los bioplásticos, hasta la implementación de técnicas de fabricación que minimizan la huella ambiental.** Finalmente, se exponen casos de éxito relacionados a procesos de diseño sostenible y tecnologías de reciclaje que están siendo implementadas en la industria.



2. INTRODUCCIÓN

Según las proyecciones de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), se espera un aumento considerable en el uso de materiales plásticos entre 2019 y 2060: de 460 a 1321 millones de toneladas; un incremento impulsado principalmente por el crecimiento económico y demográfico. Aunque se prevé también un alza en la utilización de todos los tipos de polímeros en sus aplicaciones actuales, el crecimiento más significativo se espera en los sectores de envasado (31%), transporte (14%) y construcción (16%), que, en conjunto, representarán el 61% de todo el plástico consumido. Además, la OCDE anticipa que los polímeros más ampliamente utilizados en el sector de empaques y envases serán el polietileno de baja densidad (LDPE), el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y el polipropileno (PP), con una participación del 30 y 24%, respectivamente [1].



Figura 1. Proyección del uso de polímeros en el sector de empaques y envases para el 2060
Fuente OECD. Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060

En la industria alimentaria, el polietileno (PE) se destaca como el polímero más ampliamente utilizado. Esto se debe a su resistencia química, su capacidad como aislante eléctrico y su resistencia a la radiación, bajas temperaturas y altas presiones. Además, dado que su estructura química está compuesta principalmente por carbono e hidrógeno, sin elementos polares, presenta una buena resistencia al agua, lo que se traduce en notables propiedades de barrera. Estas características lo convierten en la elección ideal para el envasado y preservación de una amplia variedad de alimentos, que abarca desde líquidos hasta productos secos [2]. En el 2021, la producción global de PE fue estimada en 106.6 Megatoneladas (MT) (más de un cuarto de la producción global de plásticos), y se espera que alcance 124 MT para el 2027 [3]. Considerando que el sector de empaques y envases utilizó el 44% del total de la producción de plásticos en el 2021 [4], se estima que el segmento del mercado del PE en empaques y envases tiene un valor de 1.10 billones de dólares [5].

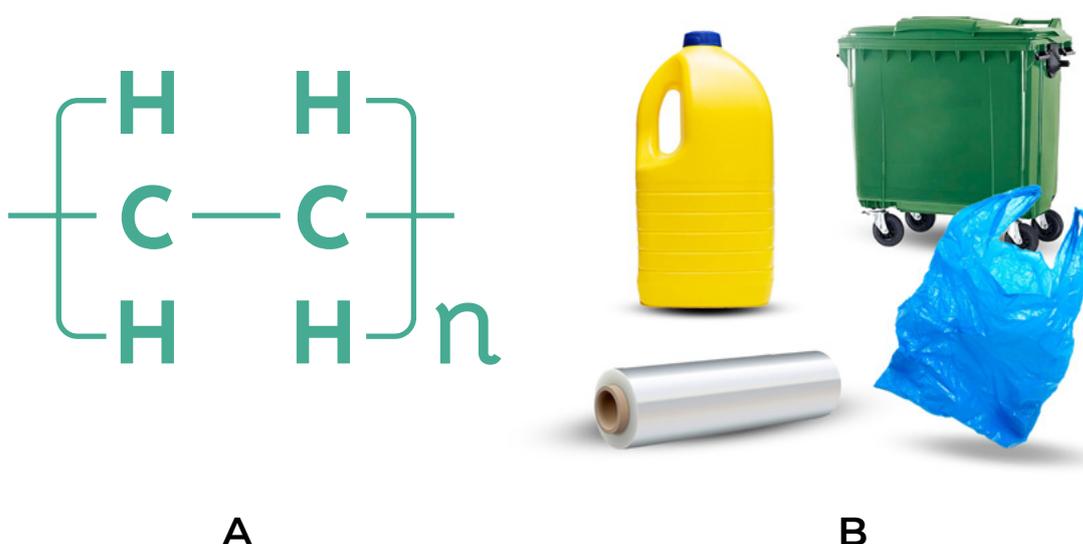


Figura 2. Polietileno. A. Estructura química. B. Productos del PE

El PE es un polímero termoplástico derivado de la polimerización del monómero de etileno, y dependiendo de su densidad y grado de ramificación, se obtienen una gran variedad de estructuras. En general, el PE se divide en dos categorías principales: baja densidad (LDPE) y alta densidad (HDPE). El LDPE se produce mediante procesos de alta presión, y se distingue por su flexibilidad debido a la presencia de numerosas ramificaciones con dos o cuatro átomos de carbono en las cadenas poliméricas. En contraste, el HDPE se produce mediante procesos de media o baja presión y se distingue por

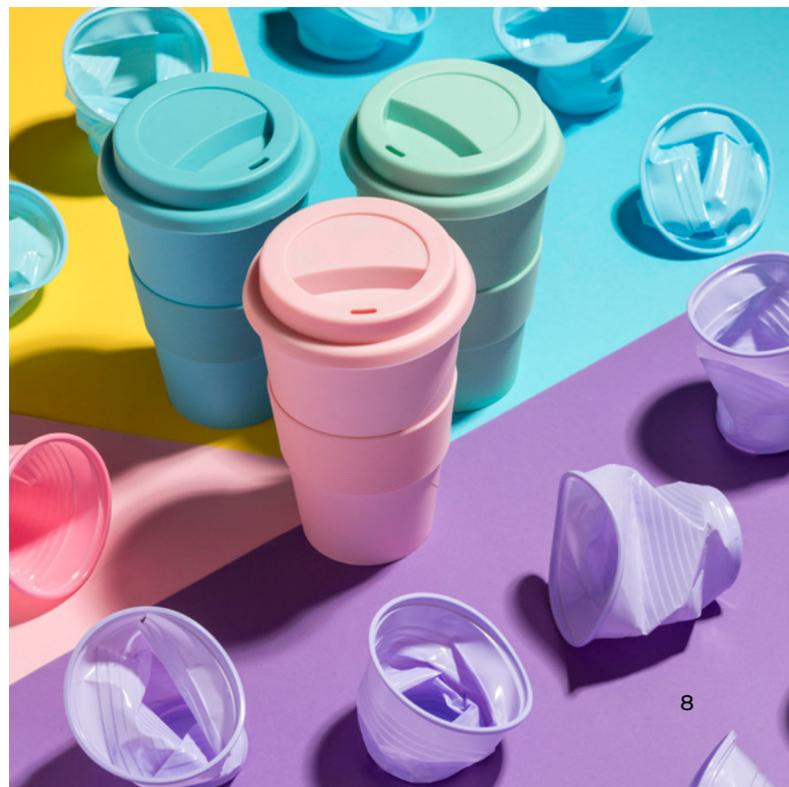
su rigidez, en comparación con el LDPE, ya que presenta un bajo grado de ramificación. Además de estas categorías, existen otros tipos de PE, como el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), que se caracteriza por cadenas lineales con ramas cortas y uniformes, lo que le confiere alta flexibilidad y resistencia al impacto; entre otras variantes están el polietileno de peso molecular ultra alto (UHMW), el reticulado, el clorado y el clorosulfonado. Cada tipo de polietileno exhibe propiedades específicas que lo hacen adecuado para ciertas aplicaciones industriales y comerciales [6], [7].

Por otro lado, el polipropileno se destaca como el material plástico de elección en la fabricación de envases de alimentos rígidos, a excepción de las botellas, para las cuales se prefieren el PET y el HDPE. El PP se caracteriza por su notable resistencia a los impactos y por su moderada barrera contra la humedad, gases y olores, la cual no se ve afectada por las variaciones de la humedad. Estas cualidades hacen del polipropileno una buena opción para el envasado de alimentos que demandan una protección adicional contra factores ambientales externos[8]. En el 2022, el volumen del mercado del PP fue de aproximadamente 79 Mt, y se espera que alcance 105 Mt para el 2030 [9]; además, se estima que el tamaño del mercado del PP en empaques y envases tenga un valor de 2.14 billones de dólares para el 2030 [10].



Figura 3. Polipropileno. A. Estructura química. B. Productos del PP

El PP es un polímero termoplástico que se obtiene, mayoritariamente, a partir de la refinación del petróleo, ya sea haciendo reaccionar en forma reversible el etileno y el buteno; o mediante un proceso de deshidrogenación del propano, o bien mediante la deshidratación del metanol para obtener etileno y propileno, por medio de una reacción catalizada con zeolita. Una vez obtenida la materia prima, la industria plástica transformadora utiliza los procesos de extrusión, inyección, soplado, calandrado y termoconformado; para convertir la materia prima en el producto final [11].



A pesar de su amplio uso en la industria alimentaria, el polietileno y el polipropileno plantean desafíos significativos para la sostenibilidad del ecosistema; La mayoría de estos materiales son descartados en el mismo año en que son fabricados, lo cual, junto con la gran cantidad de producción y su baja reciclabilidad en gran parte de las regiones del mundo, causa un problema considerable de residuos sólidos, especialmente cuando no se lleva a cabo una adecuada gestión en el sistema de disposición. Este es uno de los factores principales que contribuye a la contaminación ambiental y a la degradación del hábitat natural [12].

La inherente resistencia de estos plásticos a la degradación biológica los convierte en una amenaza persistente para los ecosistemas acuáticos y terrestres, ya que su descomposición lenta puede resultar en la liberación de microplásticos tóxicos. Además, la tasa global de reciclabilidad de plásticos, incluyendo la del polietileno y el polipropileno, es alarmantemente baja, lo que resulta en una acumulación masiva de desechos plásticos en vertederos y océanos en todo el mundo. La falta de infraestructura adecuada para el reciclaje y la reutilización de estos plásticos agrava aún más este problema, lo que resalta la necesidad de estrategias de gestión de residuos más efectivas y sostenibles [13].

En respuesta a los desafíos medioambientales planteados por el uso generalizado de polietileno y polipropileno en la industria de alimentos, se ha impulsado la adopción de modelos de economía circular. Estos modelos promueven la reutilización, el reciclaje y la reducción de residuos plásticos a lo largo de toda la cadena de suministro, y con ellos se busca minimizar el impacto ambiental de estos plásticos y fomentar la conservación de recursos mediante la implementación de prácticas como el diseño de envases reutilizables, el fomento de la recolección y el reciclaje de plásticos postconsumo, y la integración de materiales biodegradables y compostables [14].

Al incentivar la colaboración entre los actores clave de la industria alimentaria, tales como productores, distribuidores y consumidores, los modelos de economía circular ofrecen un enfoque integral y sostenible para abordar la complejidad del problema de los plásticos y promover prácticas más responsables con el medioambiente [15].

El objetivo de este capítulo es examinar los aspectos tecnológicos y ecológicos más relevantes relacionados con el tratamiento de los residuos plásticos derivados del polietileno (PE) y del polipropileno (PP). Se abordará el impacto de estos residuos en los sistemas de gestión de residuos de varios países alrededor del mundo. Además, se explorarán algunas iniciativas destinadas a promover prácticas más sostenibles y a reducir el impacto ambiental asociado con estos polímeros.



An underwater photograph showing a large amount of plastic waste, including bottles and containers, floating in the water. The scene is dimly lit, with light filtering down from the surface. The text is overlaid on the upper part of the image.

3. CONTAMINACIÓN POR PLÁSTICOS:

UNA MIRADA HACIA EL IMPACTO
ECOLÓGICO DEL POLIETILENO Y
POLIPROPILENO

De acuerdo con la revista médica *The Lancet*, la contaminación se ha convertido en una de las principales amenazas para la salud global, y es la causa de aproximadamente 9 millones de muertes anuales en todo el mundo. La contaminación, tanto ambiental como química peligrosa, se ha establecido como el factor de riesgo ambiental más significativo en relación con enfermedades y muertes prematuras, y está estrechamente relacionada con otros desafíos ambientales, como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad [16].

Los impactos de la contaminación, en particular los de aquella causada por los plásticos, se han registrado en todas las regiones del mundo, y la gravedad de su influencia varía en función del tamaño, la forma, los aditivos utilizados en su proceso de producción y el tipo de polímero. A pesar de que estos efectos adversos se manifiestan a lo largo de todo el ciclo de vida de los plásticos, desde su producción hasta su conversión en residuos, uno de los factores que contribuye de manera más significativa a la contaminación es el manejo inadecuado de los residuos plásticos, especialmente los envases y empaques de alimentos, los cuales representan el sector de mayor crecimiento dentro del mercado de plásticos sintéticos [17], [18].

Además, el costo de producción de estos materiales es considerablemente inferior al asociado a los procesos de reciclaje, lo cual incentiva no solo la manufactura masiva de estos polímeros, sino también la acumulación de sus residuos en el entorno natural, y ello causa un impacto negativo tanto en el ambiente como en la salud humana. Este problema se agrava debido a la lenta degradación de estos materiales, un proceso que puede extenderse a lo largo de décadas e incluso siglos. Esta persistencia de los residuos plásticos, junto con sus efectos nocivos en el medio ambiente, amplifica la gravedad del problema. Particularmente, la resistencia del polietileno a la degradación se atribuye a su elevado peso molecular y a su contenido de antioxidantes y estabilizadores; algunos autores afirman que la degradación del PE es más lenta en comparación a otros termoplásticos debido a la ausencia de heteroátomos y dobles enlaces en la cadena [19], [20]. En cambio, el polipropileno puede tardar varios años en degradarse debido a su estabilidad estructural, específicamente por su resistencia al agrietamiento por tensión [21].



El lixiviado de la basura plástica afecta la población y la actividad de los microorganismos del suelo, y cuando estos residuos no entran en el sistema de gestión local, son arrastrados por el viento y las lluvias, y llegan a ecosistemas terrestres y acuáticos [22]. Se estima que 1000 ríos son responsables de casi el 80 % de las emisiones fluviales anuales de plástico al océano, que oscilan entre 0.8 y 2.7 millones de toneladas por año, y los pequeños ríos urbanos se encuentran entre los más contaminados [23]. Estas dinámicas de arrastre hacen que en la actualidad haya alrededor de 30 millones de toneladas de plásticos en los océanos, y aproximadamente 8 millones de toneladas adicionales

ingresando anualmente. Se proyecta que estas cifras se duplicarán para 2030 y se cuadruplicarán para 2050. Esta contaminación tiene efectos devastadores en la vida marina, incluyendo asfixia, heridas y la incorporación de toxinas plásticas en la biomasa, lo que afecta a más de 1200 especies en el océano [24]. Además, la incineración de desechos plásticos contribuye a la contaminación atmosférica liberando partículas de plástico y sustancias tóxicas que pueden ingresar al cuerpo humano a través de la cadena alimentaria, la inhalación o el contacto directo. Esta situación representa una amenaza para la salud a nivel global [25], [26].



La presencia y acumulación de residuos plásticos en ecosistemas terrestres y acuáticos lleva a la liberación de micro y nanoplásticos. Los microplásticos son pedazos plásticos cuya dimensión más larga puede variar entre 5 mm y 1 μm , y los denominados nanoplásticos son aquellos que tienen dimensiones menores a 1 μm . Existen dos tipos de microplásticos: los primarios, fabricados intencionalmente para tener estas medidas, como sucede con las fibras sintéticas, y los secundarios, aquellos generados por descomposición de pedazos más grandes por acción del oxígeno, la radiación ultravioleta, la humedad y el calor. La problemática asociada a estos se da por el comportamiento físico, que incluye fenómenos como la acumulación, la sedimentación y la migración, por el comportamiento químico que involucra la absorción y adsorción de contaminantes y sustancias tóxicas. Finalmente, el componente biológico incluye la entrada de estos materiales a la cadena alimentaria por ingestión de diversos organismos. **En el ambiente terrestre, el consumo de microplásticos por la cadena alimentaria se da por lombrices, mientras en los ecosistemas acuáticos, como el océano, este comienza principalmente por el plancton [24], [27]–[29].**

Estas pequeñas partículas, sus constituyentes y sus productos de degradación entran en contacto con los diferentes organismos por medio de la inhalación o absorción branquial, vía oral y exposición dérmica [30], [31]. Entre los compuestos más tóxicos que resultan de la mala gestión de residuos plásticos, se encuentran los monómeros y aditivos. Los monómeros son las moléculas utilizadas como materia prima de los polímeros, y algunas de estas pueden representar un riesgo muy alto para la salud. El más peligroso es el estireno (poliestireno), seguido del 1-hexeno (LLDPE, LDPE), 1-octeno (LLDPE, LDPE), 1-buteno (PP, HDPE, LLDPE, LDPE), tereftalato de dimetilo (PET) y hexametildiamina (PVC) [18]. El propileno, usado en el PP, es el monómero de menor riesgo; de hecho, no se considera tóxico para los humanos y la vida silvestre.

Después de la degradación de este polímero, el propileno puede ingresar al cuerpo principalmente por inhalación de aire contaminado; sin embargo, solo una pequeña fracción se metaboliza a óxido de propileno, mientras que el resto se exhala inmediatamente. El etileno, usado en el PE, no se considera perjudicial para los ecosistemas acuáticos, sin embargo, dependiendo de la etapa de crecimiento, las plantas pueden ser altamente susceptibles a este monómero. Dado que el etileno es una hormona vegetal natural, la exposición a altas dosis puede causar inhibición de la fotosíntesis y el crecimiento [18], [32].

Por otro lado, los aditivos se incorporan a los materiales plásticos con el propósito de mejorar diversas propiedades, como su dureza, resistencia o color. Muchos de estos, se han relacionado con la aparición de afecciones graves para la salud, tales como anomalías reproductivas, trastornos del sistema endocrino, diabetes, pubertad temprana e incluso obesidad. **La exposición a estos aditivos plásticos puede desencadenar una alteración de la actividad endocrina a través de mecanismos que afectan distintos niveles del hipotálamo, glándula pituitaria, gónadas o tiroides [33].** Además, algunos estudios sugieren que la contaminación por plásticos puede inducir cambios epigenéticos y la modulación de la expresión génica, lo cual puede desencadenar patologías como Alzheimer, Parkinson y cáncer [34], [35]. Para el PE y PP, entre los aditivos más peligrosos, de acuerdo con la clasificación de clases de peligro de la Regulación Europea (CLP), se encuentra el ftalato de bencilo y butilo, asociado con daños en el sistema reproductivo, y el bisfenol A, un disruptor endocrino que se ha relacionado con varios tipos de cáncer y con enfermedades inmunes, tiroideas y metabólicas. Si bien los estudios demuestran que las pequeñas partículas desprendidas de los lixiviados de los residuos plásticos pueden interactuar e interferir en el metabolismo de diferentes especies, incluidos los humanos, **la información sobre los efectos de los polímeros y sus compuestos aún es limitada, especialmente para algunos tipos de polímeros y su presencia en organismos terrestres y seres humanos,** ya que la mayoría de los estudios se llevan a cabo en laboratorio y se centran en los impactos de las partículas puras, especialmente los de las micropartículas sobre organismos marinos o de agua dulce, dentro de los cuales los crustáceos y los peces son el grupo taxonómico más estudiado, seguido de los moluscos y las algas [18], [33], [36].

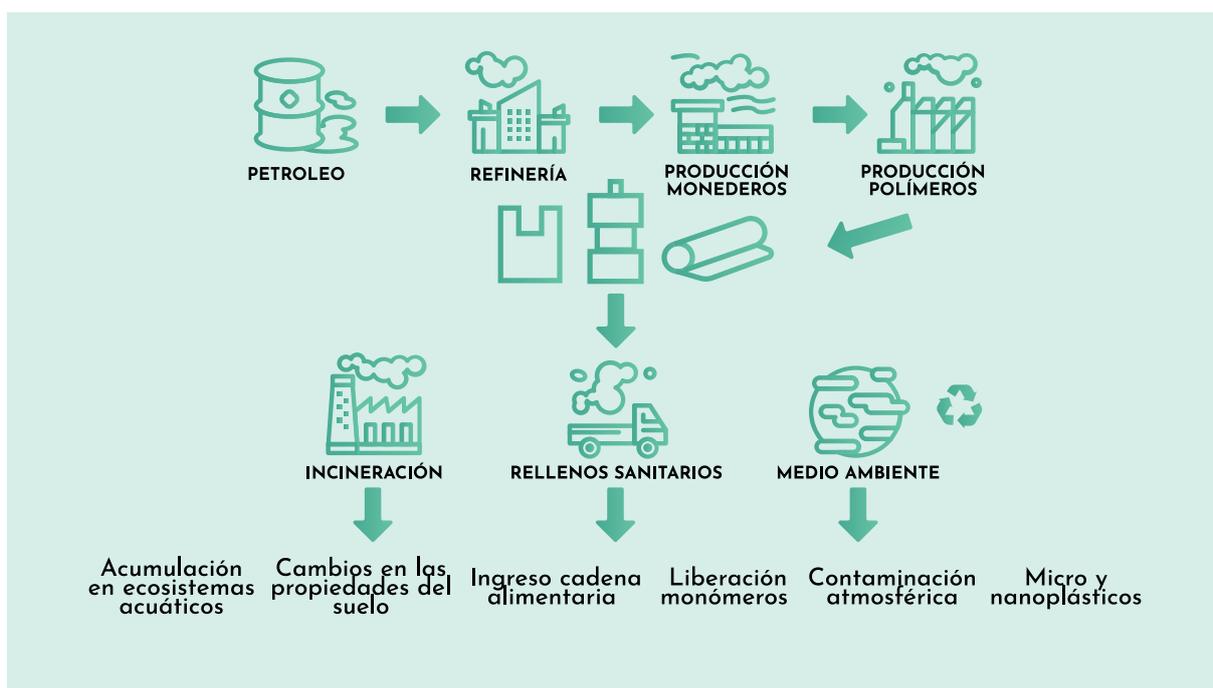


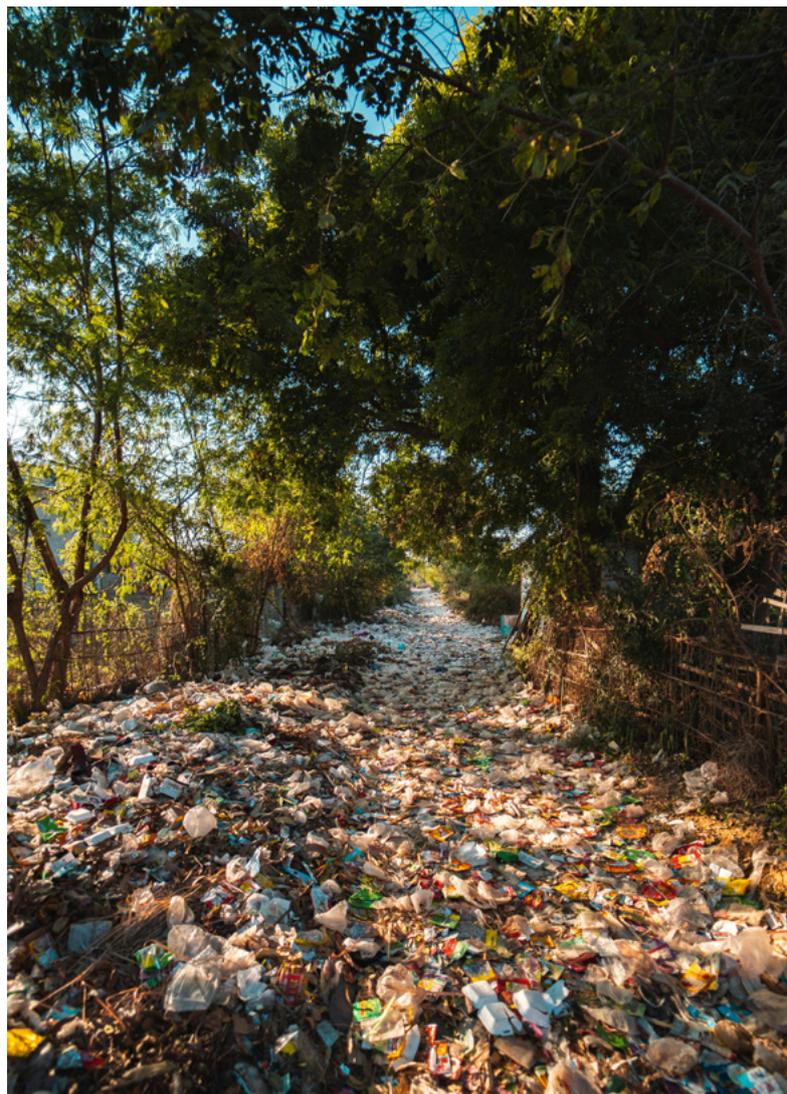
Figura 3. Contaminación por plásticos

Ahora, dado que aproximadamente el 79% de los residuos de PE se depositan en vertederos a cielo abierto, estos comienzan un proceso de oxidación ligera y natural. La radiación ultravioleta y el calor resultante provocan una fragmentación de los enlaces C-H en la estructura del polímero, que libera aditivos al medio ambiente y gases de efecto invernadero [26], [37], [38]. Además, este tipo de plástico es el residuo más prevalente en ambientes marinos y costeros, y el olor que desprende, junto con el color que presenta, suele atraer a animales acuáticos, lo que puede dar lugar a enredos o atrofia por ingestión [39], [40]. Un fenómeno preocupante es que se ha encontrado que el pez *Decapterus muroadsi* se alimenta de fragmentos de PE azul, confundidos con presas de copépodos azules; esto introduce partículas de plástico en la cadena alimentaria que se transfieren a depredadores de mayor tamaño [41]. Algunos estudios han revelado la presencia de partículas de PE en las branquias y estómago de peces cebras adultos, que ocupan el 89% del área intestinal con este polímero, lo cual puede estar relacionado con expresiones inusuales de genes asociados con la reproducción [42].



En el ecosistema terrestre, la amplia implementación del polietileno (PE) en prácticas agrícolas, combinada con un reciclaje insuficiente y una gestión inadecuada, ha propiciado la acumulación de partículas de PE en el suelo. Este fenómeno resulta en una mayor movilidad de contaminantes orgánicos hidrófobos, como pesticidas, y disminuye no solo la capacidad natural del suelo para absorber otros nutrientes, sino también, como consecuencia, la diversidad de microorganismos presentes [43]. Adicionalmente, otras investigaciones han evidenciado que las lombrices de tierra *Lumbriculus variegatus*, el invertebrado más común en los suelos, ingieren micropartículas de PE. Este consumo conduce a una disminución en la reserva de energía, un aumento en la acumulación de metales y la provocación de una actividad enzimática y expresión génica que se sitúa fuera de los parámetros normales, además de su ingreso en la cadena alimentaria de organismos terrestres [44].

El PP, por otro lado, es propenso a la fotodegradación, al calor y al oxígeno atmosférico; y aunque sufre deterioro por la intemperie, ya que la humedad acelera su degradación oxidativa, no es un polímero de fácil degradación [45]. Además, la quema de PP —una estrategia común para la gestión de estos residuos— puede liberar toxinas como cloruro de vinilo y dioxinas [46]. Las dioxinas, también conocidas como Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), se acumulan en la cadena alimentaria —principalmente en el tejido adiposo de los animales— y causan problemas en el sistema reproductivo, inmune y metabólico [47], [48]. El PP es una de las tres formas, junto con el PE y el poliestireno, más común de encontrar microplásticos en sistemas acuáticos, y se ha demostrado que estos tienen efectos toxicológicos en diversas especies acuáticas, tales como la carpa común (*Cyprinus carpio*), que demuestra cambios en parámetros bioquímicos y biomarcadores de estrés oxidativo como respuesta a la exposición de microplásticos del PP [49], [50]. En el ecosistema terrestre, la acumulación de PP y la liberación de sus compuestos y toxinas puede desencadenar cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo, como la densidad, los agregados estables de agua, la estructura, la capacidad de retención de agua y el pH; lo que plantea riesgos para la seguridad alimentaria mundial [51]. En definitiva, la gestión de residuos sólidos —especialmente de los plásticos— y la lucha contra la contaminación son desafíos apremiantes cuyo abordaje requiere una acción global coordinada, pues afectan la salud y el medioambiente en todo el mundo. Así las cosas, se requiere de métodos innovadores con la capacidad de degradar y reciclar los microplásticos con el mínimo impacto ambiental.



4. PLÁSTICOS EN NÚMEROS



En las últimas tres décadas, la demanda de plástico ha experimentado un aumento vertiginoso: se ha cuadruplicado debido al auge de los mercados emergentes. Durante el periodo comprendido entre 2000 y 2019, la producción global de plástico se duplicó, alcanzando la impresionante cifra de 460 millones de toneladas (Mt). Este aumento tiene un impacto significativo en las emisiones globales de gases de efecto invernadero, ya que el plástico contribuye con el 3.4% del total. Además, la generación de residuos plásticos a nivel mundial se multiplicó por más de dos, pues llegó a 353 Mt en 2019. Además, casi dos tercios de estos residuos tienen una vida útil inferior a cinco años; el 40% proviene de envases, el 12%, de bienes de consumo y el 11%, de prendas de vestir y textiles [52].

En 2019, se estima que 6.1 Mt de residuos plásticos ingresaron a los cuerpos de agua, de las cuales 1.7 Mt fluyeron hacia los océanos. En la actualidad, se calcula

que hay aproximadamente 30 Mt de residuos plásticos en los mares y océanos, con otros 109 Mt acumulados en los ríos. La acumulación en los ríos indica que incluso si se lograra reducir significativamente los residuos plásticos mal gestionados, las filtraciones hacia los océanos persistirían durante décadas[52].



Los desafíos en la gestión de residuos plásticos son evidentes, ya que solo el 9% se recicla (aunque el 15% se recopila para este propósito, el 40% de lo acopiado se descarta como residuo). Además, el 19% se incinera, el 50% se utiliza como relleno sanitario y el 22% evita los sistemas de gestión de residuos, terminando en rellenos sanitarios no controlados, incinerándose en fosas abiertas o contaminando entornos terrestres y acuáticos, especialmente en los países más desfavorecidos. Estos datos subrayan la urgente necesidad de abordar los problemas asociados con la producción y gestión de plástico a nivel mundial [52].



Figura 4. Cifras en el ciclo de vida y disposición final de los plásticos

En el contexto global actual, la problemática de la gestión de residuos plásticos se ha convertido en un desafío de gran envergadura. De acuerdo con el último informe de la OCDE sobre las Perspectivas Globales del Plástico, la situación mundial del reciclaje presenta preocupantes deficiencias. Aunque se destaca un aumento significativo en la producción de plástico reciclado en los últimos años, este aún representa solo el 6% del total de su producción, lo que resalta la dependencia continuada del plástico virgen en la economía global. Además, como lo muestra la figura 5, apenas el 9% de los residuos plásticos se reciclan con éxito, mientras que una parte considerable se incinera, se envía a rellenos sanitarios o se filtra en el medio ambiente [52].

La fuerte dependencia de la industria del plástico a materiales primarios vírgenes extraídos de recursos no renovables —como el petróleo crudo o el gas natural— conlleva consecuencias ambientales y sociales significativas. Este vínculo directo contribuye al agotamiento acelerado de recursos naturales emitiendo gases de efecto invernadero y provocando contaminantes tóxicos durante la producción. Además, la dependencia de plásticos vírgenes alimenta la crisis global de residuos plásticos con productos de un solo uso, lo cual contribuye a la contaminación ambiental y a la presión sobre los ecosistemas locales [53].

Para mitigar estos desafíos es esencial que la industria del plástico evolucione hacia prácticas más sostenibles, como la reutilización, el reciclaje y la integración de plásticos reciclados en la cadena de producción. Estos enfoques, al reducir la dependencia de materiales vírgenes, no solo preservan recursos, también allanan el camino hacia una economía más circular; así se aborda el impacto negativo de la industria del plástico en nuestro entorno. En este sentido es necesario adoptar un enfoque sistémico que dé lugar a un sistema práctico, sin pérdida de valor económico, libre de desechos y contaminación plástica. Es imperativo reconsiderar nuestra aproximación a la fabricación, uso y reutilización de plásticos, esencialmente rediseñando el sistema en el que se emplea este material.

De acuerdo con las cifras de la OCDE, Estados Unidos es uno de los principales generadores de residuos plásticos: supera los 76 millones de toneladas y presenta

una inquietante tasa de reciclaje del 4% en ciclo cerrado. Este enfoque implica que los plásticos recuperados por el reciclaje se reintegran al inicio de la cadena, con lo cual reducen la dependencia de materias primas vírgenes y, en teoría, fortalecen la circularidad del sistema. Sin embargo, la realidad indica que el 96% restante de los residuos plásticos enfrenta desafíos significativos en términos de gestión y reciclaje. China, por ejemplo, con más de 75 millones de toneladas de residuos plásticos generados, tiene una tasa de reciclaje en ciclo cerrado del 13%. Por su parte, la Unión Europea registra una generación de residuos plásticos superior a los 53 millones de toneladas, con tasas de reciclaje en ciclo cerrado del 14%. América Latina, con más de 12 millones de toneladas de residuos plásticos, presenta tasas de reciclaje de ciclo cerrado del 10%. Mientras tanto, Canadá, con alrededor de 7 millones de toneladas de residuos plásticos, tiene tasas de reciclaje de ciclo cerrado del 6% [53].

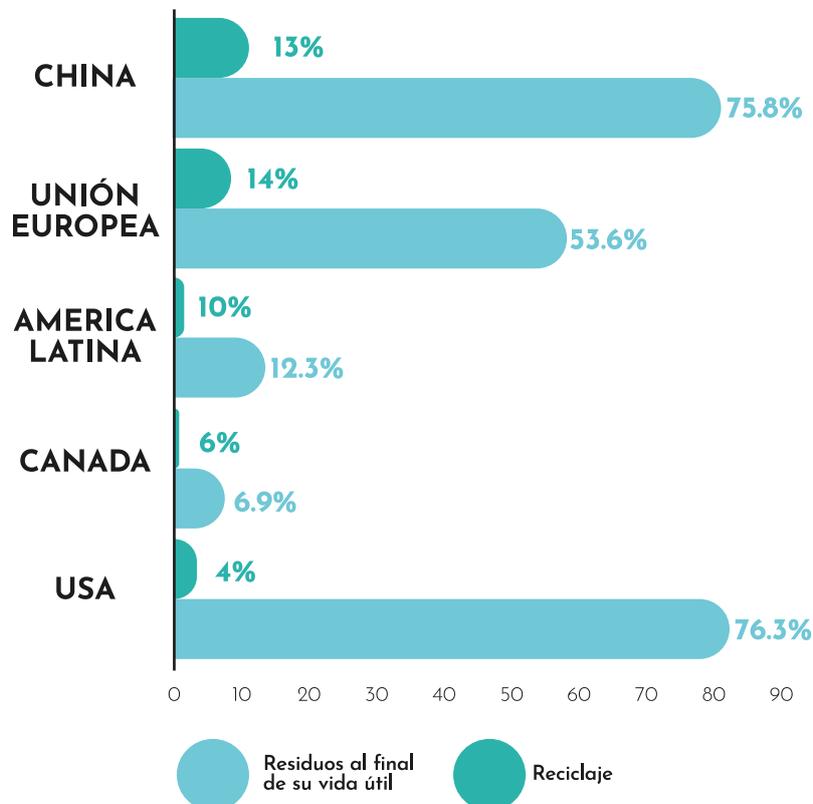


Figura 5. Cifras de contexto general del plástico y su tasa de reciclaje en los principales países de la OCDE

Un análisis detallado revela que aproximadamente el 31% de los residuos plásticos en estos países proviene de la industria alimentaria, mientras que el 16% corresponde al PP y el 12% al Polietileno LDPE y LLDPE. Estas cifras subrayan la acumulación masiva de desechos plásticos en vertederos y océanos a nivel mundial, evidenciando los desafíos críticos asociados con la gestión de residuos y la necesidad urgente de implementar medidas efectivas de reciclaje para abordar esta creciente problemática.

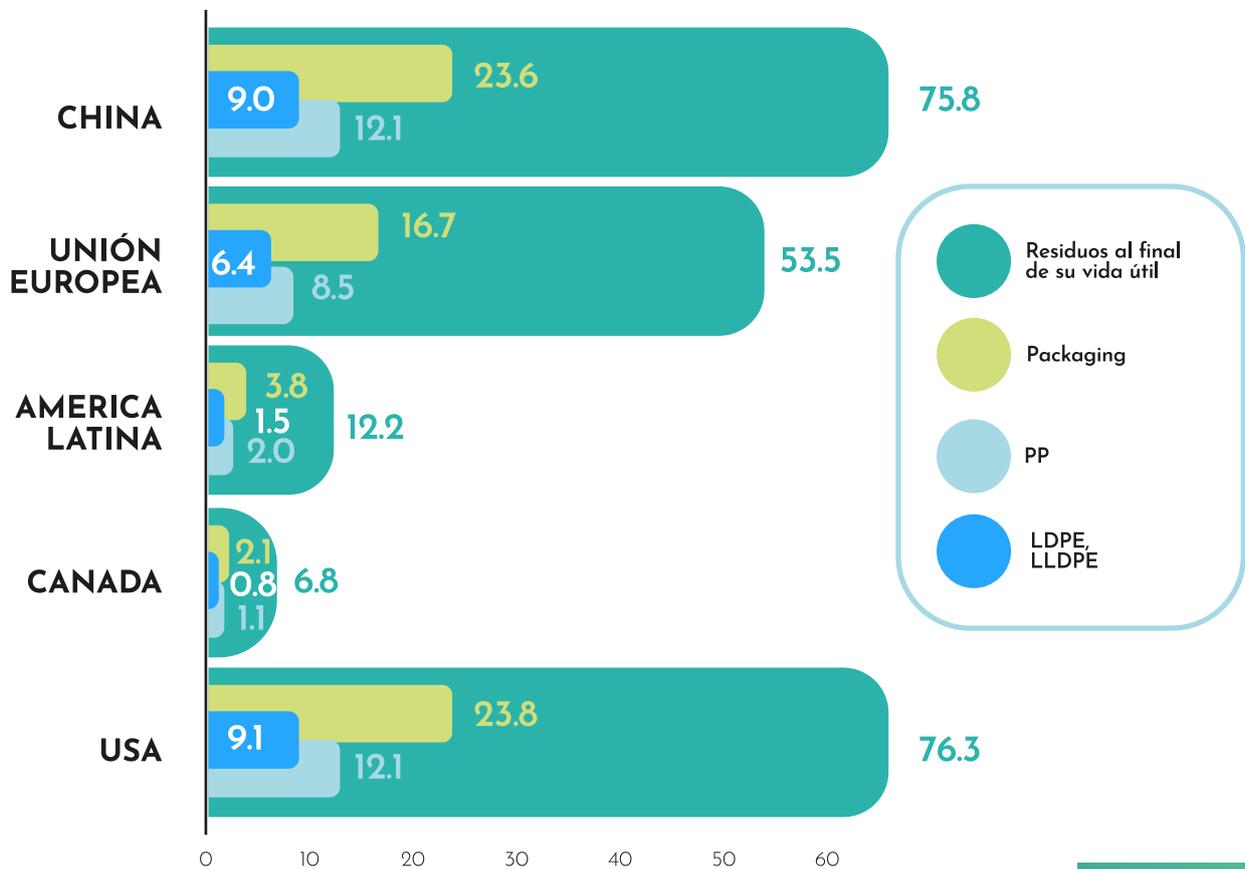


Figura 7. Cifras de contexto general del plástico y su disposición final en los principales países de la OCDE [53]

Ahora bien, abordar este conjunto de problemas de manera efectiva requiere una acción internacional coordinada. La implementación de políticas más sólidas, como impuestos sobre rellenos sanitarios e incentivos fiscales para promover el reciclaje o el desarrollo de sistemas de Responsabilidad Ampliada del Productor y el establecimiento de objetivos de contenido reciclado podrían contribuir significativamente a la mejora de la gestión de residuos plásticos. Asimismo, la inversión en infraestructura de reciclaje y el fomento de la innovación en el diseño de productos podrían impulsar la transición hacia una economía más circular y sostenible. En este contexto, la armonización de enfoques a nivel internacional, junto con

una mayor cooperación entre países de ingresos altos y bajos, se presenta como un aspecto crucial para lograr avances significativos en la reducción de la contaminación por plásticos. Es esencial aprovechar todas las fuentes de financiamiento disponibles, incluida la ayuda al desarrollo, para respaldar a los países con menores recursos en sus esfuerzos por mejorar la infraestructura de gestión de residuos y promover prácticas sostenibles. Asimismo, se deben fomentar medidas de sensibilización y educación para fomentar una mayor conciencia pública sobre la importancia del reciclaje y la reducción de residuos plásticos en la sociedad global.



5. ANÁLISIS CICLO DE VIDA: OPTIMIZANDO LA SOSTENIBILIDAD DE LOS ENVASES DE POLIETILENO Y POLIPROPILENO EN LA INDUSTRIA

En un mundo cada vez más consciente de los desafíos ambientales, la industria se encuentra en constante búsqueda de soluciones que reduzcan su huella ecológica. Una parte esencial de esta ecuación son los envases y empaques utilizados para proteger y transportar alimentos, principalmente aquellos fabricados con Polietileno (PE) y Polipropileno (PP). Para evaluar y mejorar la sostenibilidad de estos envases se utiliza una herramienta crucial: el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). La evaluación del ciclo de vida se presenta como un método integral para analizar el impacto ambiental de estos materiales, considerando desde la extracción de materias primas hasta su producción, distribución, mantenimiento, reutilización, reciclaje y eliminación; ello permite una comprensión completa de su impacto en el medio ambiente. La Norma ISO 14044 establece los requisitos para llevar a cabo un ACV, y describe las fases clave del proceso, incluida la definición del objetivo y el alcance, el análisis del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación [54].



1. Definición del objetivo y el alcance: implica establecer claramente los límites del sistema y los objetivos específicos del estudio.



2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV): implica la recopilación y cuantificación exhaustiva de todos los datos relevantes, incluyendo flujos de materiales y energía en todas las etapas del ciclo de vida del producto.



3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV): tiene como objetivo evaluar y comprender la magnitud de los impactos ambientales identificados durante la fase de análisis del inventario. Este paso es crucial para comprender la importancia relativa de los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida del producto.



4. Interpretación del ciclo de vida: implica analizar y discutir los resultados del análisis del inventario y de la evaluación del impacto. Se utilizan para formular conclusiones, recomendaciones y para la toma de decisiones informadas sobre la base de los objetivos y el alcance previamente definidos.

El ACV es útil para identificar oportunidades de mejora ambiental, proporcionar información para la toma de decisiones en la industria y el gobierno, seleccionar indicadores de desempeño ambiental y para propósitos de marketing. La norma también distingue entre estudios de ACV completos y estudios de ACV que excluyen la fase de evaluación del impacto. La norma también proporciona una serie de términos y definiciones claves, incluidos elementos del ciclo de vida, fases del ACV, conceptos relacionados con la medición de datos y resultados, así como los procesos de verificación y revisión crítica. Además, se menciona la importancia de la transparencia en la presentación de información y la necesidad de considerar el contexto y los límites del sistema al realizar un ACV. Esta herramienta es una de varias técnicas de gestión ambiental y que no aborda necesariamente cuestiones económicas o sociales, aunque su enfoque y metodologías podrían aplicarse a estos aspectos [55].

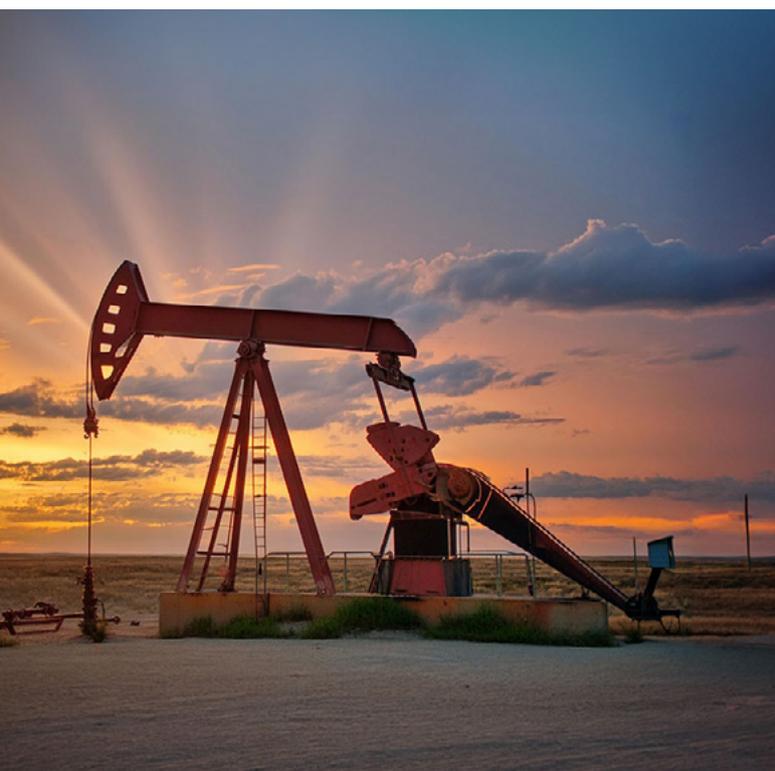
A continuación, se describe un ejemplo simplificado de un análisis de ciclo de vida (ACV) para envases y empaques de polietileno, una película para embalaje de alimentos. [56]

1 DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE

- **Objetivo:** evaluar los impactos ambientales del ciclo de vida de una película de plástico de polietileno utilizada para el embalaje de alimentos.
- **Alcance:** incluirá todas las etapas, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, considerando la fabricación, el transporte, el uso y el fin de vida útil.



2 ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA (ICV)



- **Extracción de materias primas:** extracción de petróleo para la producción de polietileno y polipropileno.
- **Fabricación de envases:** consumo de energía y agua, emisiones de gases de efecto invernadero, producción de residuos sólidos.
- **Transporte:** consumo de combustible para el transporte de materias primas y productos terminados.
- **Uso del producto:** consumo de energía en la etapa de llenado y sellado de las botellas de plástico.
- **Disposición final:** consideración de la eliminación del envase después de su uso, incluyendo opciones de reciclaje, incineración o disposición en vertederos.

3. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV)

- Evaluación de los impactos ambientales relacionados con el uso de recursos naturales, como la degradación del suelo y el agotamiento de los recursos no renovables.
- Análisis de los impactos en el cambio climático debido a las emisiones de gases de efecto invernadero durante todas las etapas del ciclo de vida.
- Evaluación de los impactos en la calidad del agua y el suelo debido a la disposición de envases de plástico en vertederos o en entornos naturales.



4. INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA:



- Identificación de áreas clave de mejora, como la reducción del consumo de energía durante la fabricación y el transporte, así como el fomento de prácticas de reciclaje y reutilización de envases de plástico.
- Recomendaciones para la optimización de procesos de fabricación y distribución con el fin de reducir los impactos ambientales y fomentar la sostenibilidad.
- Consideración de alternativas más ecológicas para el envasado de agua potable, como el uso de materiales biodegradables o la implementación de sistemas de retorno y reutilización de envases.
- Este ejemplo ilustra cómo un análisis de ciclo de vida detallado puede proporcionar información crucial para la toma de decisiones en cuanto a la sostenibilidad y la gestión ambiental en la industria de envases y empaques de polietileno y polipropileno [57].

El ejemplo de ACV desarrollado, proporciona una hoja de ruta para optimizar la sostenibilidad de los envases de polietileno y polipropileno en la industria alimentaria. Esto incluye la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la gestión eficiente de los recursos y la promoción del reciclaje. Ejemplos como el proceso STRAP, que reduce el consumo de energía en la separación de capas de envases multicapa, demuestran el potencial de estos esfuerzos. En última instancia, la búsqueda de la sostenibilidad en la industria alimentaria implica un compromiso constante con la innovación y la adopción de prácticas más amigables con el medio ambiente. Los envases de polietileno y polipropileno son una parte integral de este camino hacia un futuro más sostenible, en el cual la protección de nuestros alimentos se combina con la preservación de nuestro planeta [58]



6. LA ÚLTIMA ETAPA DEL CICLO DE LOS PLÁSTICOS:

LA DISPOSICIÓN FINAL DE LOS
RESIDUOS DE PE Y PP

La degradación natural del plástico inicia con la fotodegradación provocada por la exposición a la luz ultravioleta del sol. Este fenómeno suministra la energía de activación necesaria para iniciar la incorporación de átomos de oxígeno al polímero, y así la degradación termo-oxidativa. En este proceso, el plástico se fragmenta en pedazos más pequeños hasta que las cadenas poliméricas alcanzan un peso molecular lo suficientemente bajo como para ser metabolizadas por microorganismos, quienes transforman el carbono de las cadenas poliméricas en dióxido de carbono o lo incorporan a otras biomoléculas. Dado que este proceso de degradación natural requiere de al menos 50 años y conlleva retos ambientales como la liberación de microplásticos y toxinas al medio ambiente, se hace necesario el desarrollo de técnicas innovadoras que posibiliten cerrar el ciclo de los residuos plásticos [59].

Hasta 1980, la mayoría de los plásticos, al final de su vida útil, eran arrojados al medio ambiente, o depositados en vertederos a cielo abierto, dado que aún eran incipientes las tecnologías relacionadas con la incineración y el reciclaje [60]. A partir de la década de 1980, la incineración como método de gestión de residuos plásticos experimentó un crecimiento significativo, y en la década de 1990 surgieron otras tecnologías relacionadas con el reciclaje [24]. En la actualidad, los rellenos sanitarios son uno de los métodos más utilizados para la gestión de residuos plásticos, y la incineración y el reciclaje las opciones más comunes para la recuperación de polímeros termoplásticos, como el PE y el PP. Sin embargo, la incineración, a pesar de ser una alternativa ampliamente adoptada, plantea grandes desafíos, como la generación —y, en ocasiones, la liberación— de gases tóxicos y cenizas residuales que pueden contener plomo y cadmio. El reciclaje, en cambio, se destaca como la opción con menor impacto ambiental, ya que implica ahorro tanto de energía como de material [59]

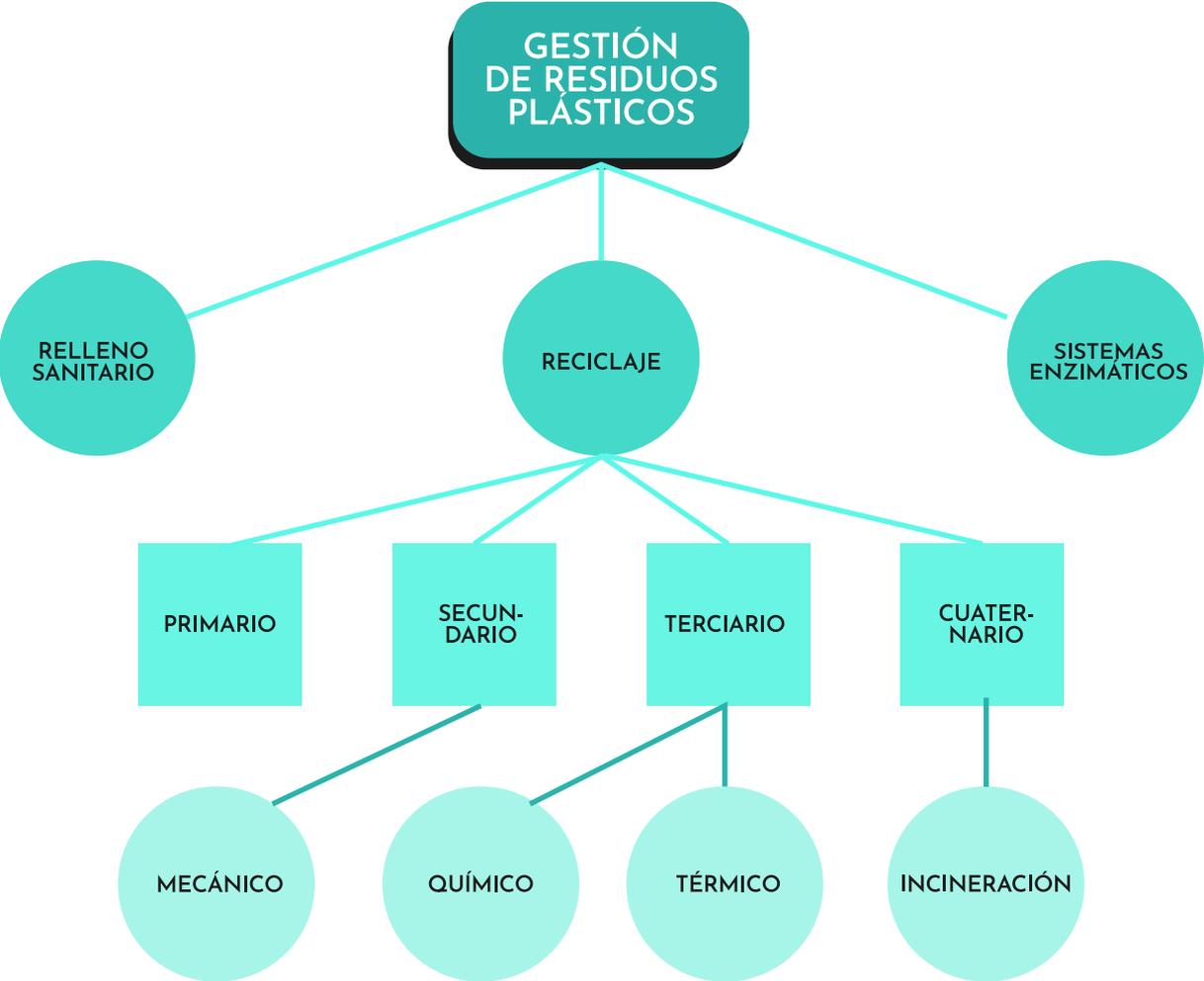


Figura 8. Gestión de residuos en la industria del plástico

6.1 Rellenos sanitarios

El enfoque convencional para la gestión de residuos sólidos, que incluye los plásticos, es el relleno sanitario. Esta técnica de disposición final implica la modificación topográfica del suelo para confinar los desechos en un área específica, cubriéndola con capas de tierra y compactando los residuos para reducir su volumen. En este sistema ingresan tanto los residuos sólidos como el agua, lo cual produce lixiviados y gases a través de procesos biológicos, químicos y físicos. Se distinguen tres tipos de relleno sanitario: mecanizado, recomendado para zonas con una generación de residuos superior a 40 toneladas diarias; semi-mecanizado, sugerido para áreas con una generación entre 16 y 40 toneladas diarias; y manual, indicado para zonas con menos de 15 toneladas diarias [61].

El tratamiento de residuos en este sistema se desarrolla en cinco fases: i) biodegradación aeróbica; ii) transición a condiciones anaeróbicas; iii) formación de ácido (hidrólisis); iv) fermentación de metano; y v) maduración final y estabilización de los residuos sólidos. Los plásticos depositados en los rellenos experimentan fragmentación en micro y nanoplásticos debido a las condiciones aeróbicas y anaeróbicas del proceso, así como a las significativas fluctuaciones de temperatura (60-90 °C) y pH (4.5 a 9), estrés físico, compactación, actividad microbiana y generación de gases, como dióxido de carbono, metano y compuestos orgánicos volátiles [62]. Algunos estudios indican que el PE predomina entre los microplásticos en vertederos, con un 41.1% correspondiente a residuos de bolsas de PE, un 30.9% de otros plásticos, como el PP, el PVC y el poliestireno, y un 28% a otros desechos plásticos [63], [64].

Aunque los rellenos sanitarios están concebidos para evitar intercambios con el entorno circundante, algunos vertederos de liberación controlada de contaminan-



tes permiten la migración gradual de lixiviados al medio ambiente, siempre bajo condiciones monitorizadas. En cambio, los rellenos de liberación irrestricta de contaminantes, generalmente asociados a instalaciones en desuso, carecen de control sobre los lixiviados, lo que implica que tampoco hay regulación sobre los impactos en la liberación de microplásticos y toxinas al ambiente [65], especialmente en aguas subterráneas. Según el estudio de Bharath *et al.* [66], el 90% de los microplásticos presentes en las aguas subterráneas evaluadas se originaron a partir de plásticos enterrados, según las características morfológicas identificadas. En particular, los dos rellenos cercanos contribuyeron con el 92% de los microplásticos presentes en estas aguas, y las principales fuentes de transferencia fueron el viento, la escorrentía superficial, los efluentes y la influencia de la biota, incluida su eliminación por parte de los animales [67].

Ventajas de los rellenos sanitarios

- **Tecnificación de los rellenos sanitarios:** en los últimos años, el desarrollo de estos sistemas ha evolucionado para cumplir con la normativa ambiental legal y vigente en cada país. En la mayoría de los casos, se exige la implementación de controles ambientales, técnicos, de gestión y operación. En el ámbito del control ambiental se lleva a cabo una evaluación exhaustiva de los sistemas de evacuación de aguas pluviales, los cuales deben ser altamente eficientes para evitar la infiltración de líquidos percolados de residuos y para prevenir la contaminación de la capa freática. Además, se hace hincapié en el control de la impermeabilidad de la superficie que sustenta los residuos, la eliminación de gases mediante sistemas de ventilación y programas para controlar vectores biológicos como moscas y roedores. Finalmente, el cierre de un relleno sanitario, que implica la finalización de las operaciones y, por ende, la clausura del lugar debe incluir actividades de limpieza superficial y la colocación de una capa de cobertura de sellado. Asimismo, se requieren sistemas de control de aguas superficiales y de drenaje, medidas para el control de gases de vertedero y lixiviados, así como sistemas integrales de monitoreo ambiental [61].
- **Generación de energía:** el gas producido en los rellenos sanitarios es un subproducto de la descomposición de residuos, compuesto principalmente por alrededor del 50% de metano, un 50% de dióxido de carbono y una pequeña cantidad de compuestos orgánicos volátiles. En algunos rellenos se han implementado sistemas con la capacidad de extraer este gas a través de una serie de pozos y utilizarlo para la generación de energía eléctrica, producción de combustibles y gas natural renovable [68].
- **Reducción de volumen:** la compactación de los residuos en los rellenos sanitarios contribuye a reducir su volumen, maximizando la capacidad de almacenamiento del sitio.



Desventajas de los rellenos sanitarios

- **Riesgo de contaminación:** los rellenos sanitarios crean lixiviados y partículas contaminantes que pueden filtrarse en el suelo y el agua subterránea. En el caso de los plásticos, los vertederos son la principal fuente de contaminación por microplásticos en estos ecosistemas. Aunque los rellenos sanitarios tecnificados han intentado reducir el alcance de este problema, los residuos plásticos alrededor de estos rellenos, ya sean activos o antiguos, continúan siendo una fuente significativa de microplásticos. Además, estas partículas posibilitan la liberación de moléculas tóxicas, ya que pueden actuar como portadoras o quelantes de diversos contaminantes, como metales pesados, aditivos, monómeros y compuestos tóxicos farmacéuticos; debido a que estos elementos se adhieren fácilmente a la superficie del microplástico por su hidrofobicidad. Adicionalmente, si no se cuenta con sistemas de extracción, eliminación o aprovechamiento de gases; los rellenos contribuyen al deterioro en la calidad del aire, debido a la liberación de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono y metano, cuya exposición causa aproximadamente 1 millón de muertes prematuras al año, y es el responsable del 30% del calentamiento global desde la época preindustrial [61], [62], [69], [70].
- **Capacidad limitada:** aunque la compactación reduce el volumen de residuos, los rellenos sanitarios tienen una capacidad limitada lo que determina su vida útil finita. Esto ocasiona un encarecimiento del sistema y la necesidad de habilitar nuevos sitios como rellenos.



En general, los vertederos se consideran una estrategia poco deseable para residuos de empaques plásticos, aunque se reconocen indispensables para albergar otros residuos no reciclables y no combustibles. Aunque a lo largo de los años las presiones legislativas han exigido y siguen exigiendo que se reduzcan los residuos que van a los vertederos, es necesario desarrollar estudios plurianuales que plasmen, analicen y reporten públicamente datos relevantes sobre estos sistemas e incluyan información sobre las características y variabilidad de los microplásticos, incluidos los cambios que estos sufren en el tiempo [62], [71], [72].

6.2 Reciclaje

En las últimas décadas, el enfoque predominante en la investigación y la promoción tanto en entornos académicos como industriales ha sido el reciclaje de residuos plásticos.

Siguiendo el Estándar Global de Reciclaje (GRS), este proceso se organiza en cuatro categorías de prioridad. Los procesos primarios buscan reusar los productos en su estructura original, por medio de la recuperación y reciclaje de los polímeros preconsumo o puros para su reutilización en el mismo propósito. Los procesos secundarios se centran en la recuperación de residuos posconsumo, que se clasifican, recortan y extruyen, y dan como resultado un producto con propiedades físico-mecánicas reducidas en comparación con el polímero original, que en la mayoría de los casos no puede reutilizarse para el mismo fin. Tanto el reciclaje primario como el secundario representan procesos físicos que pueden repetirse varias veces. Por otro lado, los procesos terciarios emplean el reciclaje químico para polímeros que ya no son aptos para el reciclaje mecánico, mientras que los procesos cuaternarios se utilizan para la

producción de energía. Además, es importante mencionar que los polímeros y plásticos que terminan en vertederos pierden por completo su valor y se convierten en desechos [73].

El reciclaje desempeña un papel crucial en la reutilización de materiales de desecho, incluido el plástico, pues al reintroducirlos en un proceso de transformación los convierte en nuevos materiales útiles. Su importancia radica en su contribución para abordar una serie de desafíos creados por el ser humano, como la gestión más eficiente de los recursos naturales no renovables, la reducción del consumo de energía y la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero. El reciclaje mecánico de PE y PP es una práctica esencial en la gestión de residuos plásticos. **Ambos polímeros son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones, incluyendo envases y productos de consumo, debido a sus propiedades mecánicas y de barrera. Sin embargo, a medida que los plásticos PE y PP llegan al final de su vida útil es fundamental encontrar formas efectivas de reciclarlos y reducir su impacto ambiental [74].**



El objetivo de este proceso es recuperar —de forma directa o indirecta— los componentes que contienen los residuos. Este proceso debe tener en cuenta ahorrar energía, recursos naturales, disminuir el volumen de residuos a eliminar, y ser amigable con el medio ambiente.

Este proceso se puede dar de dos maneras: i) separación de componentes para su recuperación directa, dando origen al proceso de “recogida selectiva”, para lo cual se requiere que la sociedad participe depositando en diferentes recipientes los residuos que se producen; ii) efectuando un tratamiento mediante técnicas como la trituración, cribado y clasificación neumática para la preparación del residuos y separación de fracciones ligeras, además de sistemas de clasificación que utilizan sistemas electromagnéticos, electrostáticos, ópticos, entre otros, para la obtención y depuración de los residuos [61].

En el intento de reciclar plásticos hay desafíos únicos derivados de los productos químicos añadidos —incluidos acabados como tintes para impresión y recubrimientos— durante la producción de los polímeros [75]. Además, el reciclaje de plásticos para envases de alimentos también requiere que los plásticos de desecho estén limpios de contaminantes alimentarios, lo que implica el involucramiento de procesos que permitan la desorción de cualquier sustancia alimentaria sobre los polímeros. Los procesos de reciclaje de plástico se centran en gran medida en métodos de reciclaje primario y secundario, lo que exige un crecimiento en la adopción de otros procesos de reciclaje para mejorar la capacidad y la eficiencia de estos métodos. Vale la pena señalar que, a medida que se reciclan continuamente utilizando estos métodos, los desechos plásticos pierden sus propiedades físicas y químicas, lo que da como resultado productos finales de tan baja calidad, que justifica su incineración. Los plásticos reciclados de buena calidad costarían entre el 60% y el 70% del precio del plástico virgen, pero este valor cae a medida que las propiedades se ven comprometidas por el reciclaje repetido [76]. Como tal, es mejor incinerar o reciclar químicamente estos plásticos de embalaje primario. Los envases secundarios y terciarios tienen menos variación de materiales y, por lo tanto, se clasifican fácilmente para su reciclaje o reutilización, a diferencia de los envases primarios que están variados, contaminados y habitualmente dañados y, por lo tanto, presentan problemas de clasificación, reciclaje y reutilización [77]. Por último, se prevé que la investigación y el desarrollo continuo de enfoques innovadores enfocados principalmente en el reciclaje terciario y la gestión basada en sistemas biológicos darán avances significativos en los próximos años, lo que nos permitirá acercarnos progresivamente a la transformación de una economía lineal en un modelo circular.



6.2.1 Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico de plásticos es un proceso mediante el cual los residuos plásticos se trituran y se convierten en gránulos o pellets que luego se utilizan para fabricar nuevos productos. Este método implica varias etapas, que incluyen la recolección y clasificación de los residuos plásticos, así como su posterior limpieza y trituración en escamas o gránulos de tamaño uniforme. Como estos gránulos se pueden utilizar como materia prima para la fabricación de una amplia gama de productos plásticos, ello reduce la dependencia de las materias primas vírgenes y contribuye a la reducción de residuos y la conservación de recursos naturales. El reciclaje mecánico de plásticos, además de ser una práctica importante en la gestión sostenible de residuos, desempeña un papel fundamental en la economía circular al promover la reutilización de materiales y la reducción del impacto ambiental de los plásticos en el medioambiente [78].



El polietileno, con su estructura lineal, es propenso a la degradación termooxidativa y termomecánica durante el reciclaje. Esto significa una reducción en el peso molecular y un aumento en la cristalinidad del polímero, lo que afecta sus propiedades mecánicas. A medida que se recicla el PE, se observa la escisión de cadenas y una disminución en la elongación en el punto de rotura. El reciclaje repetido puede llevar a una mayor degradación del polímero. Estas características hacen que el reciclaje mecánico del PE sea un proceso desafiante, y es esencial utilizar métodos de estabilización para contrarrestar la degradación radical [79]. Por otro lado, el polipropileno (PP) presenta una estructura altamente ramificada, lo que reduce su densidad y facilita su reciclaje. Sin embargo, la estructura ramificada del PP lo hace más susceptible a la degradación por cizallamiento y a la formación de grupos funcionales reactivos. Durante la extrusión y el reciclaje, el

PP puede experimentar una escisión de cadenas, lo que afecta su rendimiento. A diferencia del PE, el PP tiende a estabilizarse mejor durante el reciclaje, especialmente cuando se emplean sistemas de estabilización, como los fenólicos y las aminas impedidas [80]

A pesar de los desafíos, el reciclaje mecánico sigue siendo una vía importante para dar nueva vida a los plásticos PE y PP. La reducción de la cantidad de plástico que llega a los vertederos y su transformación en nuevos productos contribuyen a la sostenibilidad y a la conservación de los recursos. Sin embargo, es crucial comprender y abordar las complejidades de estos procesos de reciclaje para mantener la calidad y el rendimiento de los productos reciclados. La investigación continua y el desarrollo de técnicas de estabilización son fundamentales para mejorar la eficacia y la sostenibilidad del reciclaje mecánico de estos polímeros [79].

6.2.1.1 Proceso de reciclaje mecánico

El proceso de reciclaje mecánico es una técnica utilizada para recuperar plásticos como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP) mediante operaciones físicas, sin cambiar la estructura química del polímero. A continuación, se describe el proceso en varias etapas:



- 1. Recogida y clasificación:** en esta fase, los materiales de desecho de PE y PP se recogen de diversas fuentes, como residuos de envases, productos desechados, etc. Luego, se clasifican según su tipo y calidad.
- 2. Trituración:** los materiales recolectados se trituran en fragmentos más pequeños, lo que facilita el manejo y el transporte en las etapas posteriores del proceso.
- 3. Lavado y separación:** los fragmentos triturados se lavan para eliminar cualquier contaminante, como suciedad, etiquetas, tinta, etc. Luego, se separan en función de su densidad, utilizando métodos de flotación o separación en medio denso.
- 4. Extrusión:** los fragmentos limpios y clasificados se funden y se pasan a través de una máquina extrusora, donde se forman en forma de *pellets* o gránulos. Durante la extrusión, se aplican altas temperaturas y presiones para dar forma a los materiales.
- 5. Fabricación de productos reciclados:** estos *pellets* de PE y PP reciclados se utilizan para fabricar nuevos productos, los cuales se pueden utilizar en una variedad de aplicaciones, como envases, tuberías, componentes automotrices y más. El reciclaje mecánico del PE y el PP puede reducir significativamente su impacto ambiental en comparación con la producción de plástico virgen. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la efectividad del reciclaje depende de múltiples factores, incluyendo la calidad de los materiales reciclados, las prácticas de manejo y la disponibilidad de tecnologías de reciclaje avanzadas. Los resultados del ACV son fundamentales para tomar decisiones informadas sobre la sostenibilidad de estos procesos y productos [78]

El reciclaje mecánico, como método predominante en la gestión de residuos, presenta varias ventajas en términos de sostenibilidad, aunque también plantea algunas limitaciones. A continuación, se detallan las ventajas y desventajas clave de esta práctica:

Ventajas del reciclaje mecánico

- **Conservación de recursos naturales:** el reciclaje mecánico permite reutilizar materiales plásticos sin comprometer su integridad química original, lo que reduce la necesidad de extraer recursos naturales como petróleo o gas natural.
- **Reducción de emisiones de CO₂:** en comparación con la producción de plástico virgen, el reciclaje mecánico requiere menos energía y, por lo tanto, conlleva una reducción significativa en las emisiones de CO₂. En otras palabras, contribuye a la mitigación del cambio climático.
- **Conservación de energía:** el reciclaje mecánico consume considerablemente menos energía en comparación con la producción de plástico a partir de materias primas vírgenes, lo que contribuye a la eficiencia energética y a la reducción del impacto ambiental.
- **Reducción de residuos en vertederos:** al disminuir la cantidad de plástico que termina en los vertederos, el reciclaje mecánico ayuda a prolongar la vida útil de estos sitios y a reducir la contaminación ambiental asociada con los desechos plásticos.
- **Creación de empleo y economía circular:** la industria del reciclaje mecánico genera empleo en varias etapas del proceso —desde la recolección hasta la fabricación de productos reciclados— lo que contribuye a un sistema económico más circular y sostenible.





Desventajas del reciclaje mecánico:

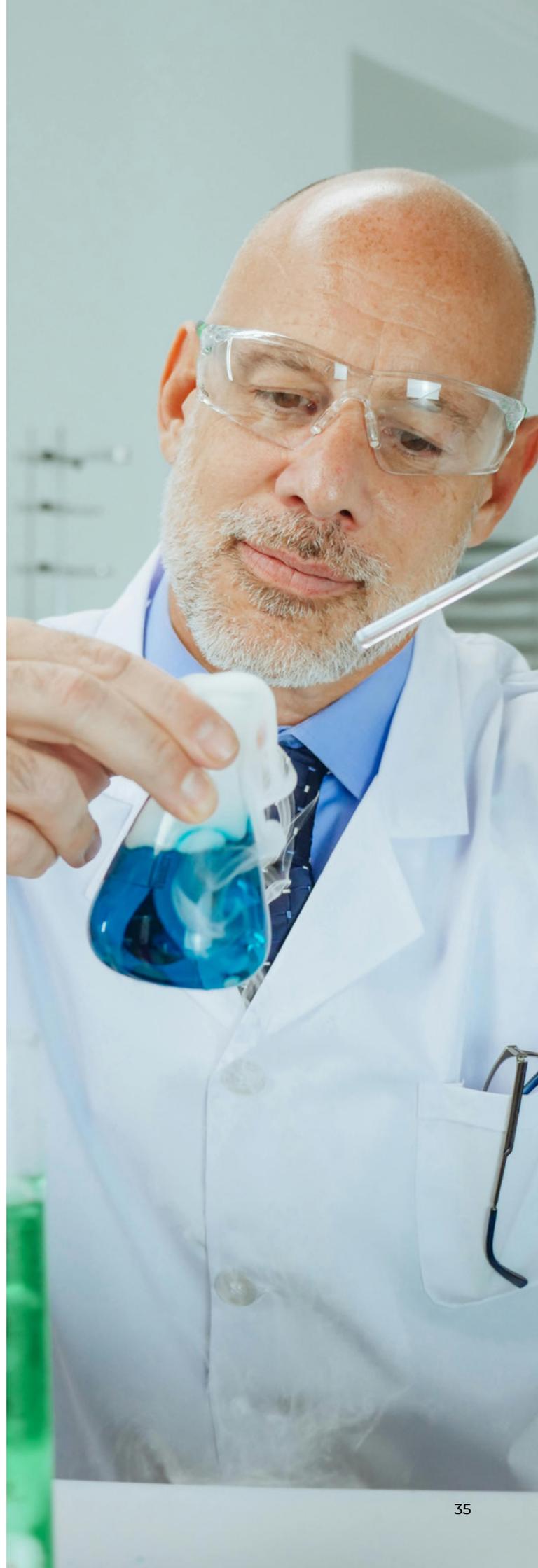
- **Limitaciones de calidad:** en ciertos casos, el reciclaje mecánico puede resultar en una calidad de plástico reciclado inferior en comparación con el plástico virgen, lo que limita su uso en ciertas aplicaciones de alta calidad.
- **Contaminación y separación de materiales:** la contaminación y la presencia de materiales no deseados pueden dificultar el proceso de reciclaje mecánico, lo que requiere una cuidadosa separación y clasificación de los materiales para garantizar la calidad del producto final.
- **Dependencia de la demanda de mercado:** la viabilidad del reciclaje mecánico a menudo depende de la demanda y la aceptación del mercado de productos reciclados, lo que puede presentar desafíos en entornos con una demanda limitada de productos reciclados.

En general, el reciclaje mecánico sigue siendo una práctica esencial en la gestión de residuos, ya que ofrece numerosos beneficios para abordar los desafíos ambientales y económicos asociados con la producción y el manejo de plásticos. Sin embargo, es importante considerar y abordar las limitaciones y desafíos asociados con esta práctica para maximizar sus beneficios [78].

6.2.2 Reciclaje químico

El reciclaje químico tiene la capacidad de cerrar el ciclo de los plásticos al reintroducirlos en los sistemas de producción y consumo, transformando químicamente los polímeros en monómeros o despolimerizándolos parcialmente en oligómeros mediante una o un conjunto de reacciones químicas. Estos monómeros se pueden utilizar para crear productos de alto valor agregado, como nuevos polímeros con propiedades controladas, o para sintetizar de nuevo el mismo plástico [81]. Los métodos de reciclaje químico se clasifican según las condiciones de reacción, y entre ellos se incluyen los procesos de solvólisis (hidrólisis, metanólisis y glucólisis) y despolimerización catalítica [73].

Este tipo de reciclaje ha despertado interés a raíz de los retos y desafíos que enfrenta el reciclaje mecánico, y aunque esta técnica tiene un gran potencial para residuos plásticos heterogéneos y contaminados, los costos asociados a los procesos de despolimerización química pueden ser elevados —a veces superando incluso los costos de producción de polímeros vírgenes— lo que ha llevado a una participación aún marginal en el mercado de plásticos reciclados [82]. Sin embargo, en la actualidad se están investigando otros métodos basados en reciclaje químico para su implementación en la industria, apoyados principalmente por la Unión Europea, una de las regiones que más recursos está destinando para mejorar el reciclaje químico y otras soluciones tecnológicas de vanguardia, con el objetivo de producir 1.2 Mt de plástico reciclado para el año 2025 y 3.4 Mt para 2030 [83].



Ventajas del reciclaje químico

- **Obtención de productos con alto valor agregado:** a diferencia de otros procesos de reciclaje, este método tiene la capacidad de transformar los residuos plásticos en moléculas completamente nuevas, apropiadas para la síntesis de materiales con propiedades controladas, por lo que pueden utilizarse como materias primas en la fabricación de productos con alto valor agregado [84].
- **Tratamiento de residuos complejos:** esta técnica es eficaz para el tratamiento de una amplia gama de plásticos, incluyendo aquellos contaminados o compuestos por múltiples capas [84].
- **Disminución en la dependencia de materiales derivados del petróleo:** la despolimerización de plásticos reciclados para la obtención de nuevos polímeros posibilita la diversificación de la matriz de suministro en la industria del plástico, reduciendo así la necesidad de depender exclusivamente de materias primas vírgenes, como el petróleo y sus derivados, para la producción de materiales plásticos [85].



Desventajas del reciclaje químico

- **Costo:** las técnicas de reciclaje químico tienden a tener costos elevados, debido a que la instalación, mantenimiento y puesta a punto de estos procesos demandan la implementación de equipos y plantas especializadas, la contratación de personal capacitado y la aplicación de protocolos de trabajo costosos de desarrollar, ejecutar y sostener [86].
- **Estado de desarrollo tecnológico:** aunque el reciclaje químico es una opción prometedora para aumentar el reciclaje de residuos plásticos; muchas de estas técnicas aún se encuentran en investigación, por lo que desarrollarlas a escala industrial requiere de mayores esfuerzos técnicos y económicos. En el estudio de Solis & Silveira [87] se evaluaron ocho tecnologías de reciclaje químico para tratar residuos mixtos de plástico, y se determinó que solo tres de ellas se encontraban en una etapa de despliegue comercial (TRL9).
- **Impacto ambiental:** algunas de las tecnologías de reciclaje químico requieren grandes demandas de energía, adicional a que algunos de estos procesos también podrían liberar emisiones peligrosas y flujos de desecho que liberan una gran variedad de contaminantes, como compuestos orgánicos volátiles y gases de efecto invernadero [88].

Entre los métodos de reciclaje químico evaluados en PE y PP se encuentra la hidrogenólisis, oxidación y metátesis cruzada [89]. La hidrogenólisis es una reacción química que utiliza moléculas de H_2 para dividir los polímeros en alcanos más pequeños mediante la activación de los enlaces C-C en las estructuras principales del PE y PP [90]. Un avance destacado en esta técnica fue reportado por Poeppelmeier *et al.* [91], quienes emplearon nanopartículas de platino soportadas sobre titanato de estroncio ($SrTiO_3$) como catalizadores heterogéneos. Este catalizador fue capaz de convertir una gran variedad de materiales de PE con diferentes pesos moleculares en los mismos productos de bajo peso molecular con una distribución estrecha, incluso funcionó en una bolsa de plástico de calidad comercial. Por otro lado, dado que el oxígeno es capaz de iniciar la oxidación a baja temperatura de varias moléculas orgánicas, este se utiliza para generar una degradación oxidativa de algunos polímeros, como el PP [92]. Elmanovich *et al.* [93] reportaron el uso de CO_2 supercrítico rico en oxígeno como medio de reacción para la oxidación del PP, utilizando nanopartículas de óxido de manganeso (Mn_2O_3) como catalizador para mejorar la velocidad de oxidación. Por último, la metátesis cruzada utiliza catalizadores como Re_2O_7 y Al_2O_3 para transformar HDPE, LDPE y LLDPE en ceras y aceites de bajo peso molecular en condiciones de reacción no exigentes [89]. A pesar de los avances en investigación de estas técnicas y de los resultados obtenidos bajo condiciones relevantes y similares al entorno real, son necesarios más estudios que ayuden a mejorar la eficiencia, escalabilidad y costo de las técnicas.



6.2.3 Reciclaje térmico

Este proceso, también conocido como reciclaje termoquímico, consiste en la descomposición de los polímeros debido al aporte de energía derivado de las altas temperaturas [94]. La conversión termoquímica del plástico comprende principalmente los métodos de pirólisis, gasificación e hidrocrackeo, los cuales, a diferencia de otros métodos térmicos—como la incineración— pueden reducir las emisiones de carbono, aumentar la eficiencia de la conversión, y contribuir a cerrar el ciclo de los plásticos [95].



6.2.3.1 Pirólisis

Es un proceso en el que se rompen las moléculas a altas temperaturas (entre 300 y 900° C) y en ausencia de oxígeno. En este proceso se pueden emplear diversos tipos de catalizadores que mejoran su eficiencia al facilitar reacciones específicas y reducir la temperatura y el tiempo requeridos [96]; generando mezclas líquidas o de cera ricas en hidrocarburos, que pueden ser materias primas adecuadas para una refinería [97].

Actualmente, no existen plantas a escala comercial que conviertan residuos sólidos mixtos; las existentes, principalmente en Japón y EE. UU., están operando como un elemento en el sistema integrado de gestión de residuos. Este proceso, además de reducir el volumen de los desechos, permite la recuperación de energía, contenido mineral y/o químico a través de la generación de diversos subproductos, como el gas de síntesis, el metanol, el combustible, el carboncillo o el coque [98].



Existen dos tipos de pirólisis: la térmica y la catalítica. La pirólisis térmica se utiliza para el reciclaje de aquellos polímeros cuya despolimerización es difícil, pues no pueden reciclarse mecánicamente, tales como mezclas de PE/PP/PS, envases multicapa y fibras reforzadas. Debido a las altas temperaturas del proceso de pirólisis, se garantiza la ruptura de los enlaces moleculares en las cadenas poliméricas, y de acuerdo con la naturaleza del polímero, se puede dar una despolimerización o una fragmentación aleatoria. Por otro lado, la pirólisis catalítica se puede llevar a cabo en los mismos polímeros a temperaturas más bajas mediante la formación de carbocationes y la posterior isomerización. Los avances en este tipo de pirólisis se han enfocado en obtener una amplia gama de catalizadores sintéticos que mejoren el proceso y la calidad del aceite líquido producido, y la mayoría de los catalizadores son ácidos heterogéneos, como las zeolitas, la alúmina y el sílice, y generalmente no son selectivos, lo que resulta en una amplia distribución de gases (hidrocarburos C_3 y C_4), líquidos (cicloparafinas, oligómeros y aromáticos) y productos sólidos (carbón, coque). Tanto el enfoque de la pirólisis térmica como el de la catalítica tienen altas tasas de conversión, estabilidad térmica de los productos y, en algunos casos, producción de petróleo enriquecido de alto valor [89], [97].

Para llevar a cabo la pirólisis es necesario someter los residuos plásticos a un pretratamiento para garantizar que no estén

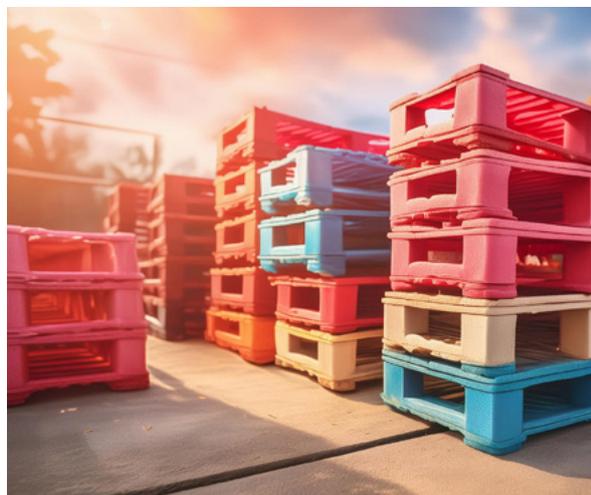
contaminados con materiales no plásticos, como metal o madera. Este pretratamiento implica la clasificación, trituración o tamizado de los residuos según su origen. Además, dependiendo del tipo de reactor utilizado, puede ser necesario que los residuos plásticos tengan un tamaño uniforme, lo que añade un costo adicional al proceso. Por ejemplo, mientras los hornos rotatorios pueden acomodar plásticos de diferentes tamaños y formas, los reactores de lecho fluidizado requieren una uniformidad de tamaño para mantener una termodinámica constante en el reactor [99].

Algunos estudios indican que se pueden lograr mayores rendimientos para el HDPE en varios tipos de reactores al utilizar temperaturas entre 300 y 550 °C, una velocidad de calentamiento en el rango de 5 a 10 °C/min y lavado con gas nitrógeno [100], [101]. Sin embargo, debido al aumento de la ramificación del LDPE, que resulta en una fuerza intermolecular más débil y menos resistencia a la tracción, se obtienen mayores rendimientos usando temperaturas más bajas, velocidades de calentamiento más lentas y aplicando presión en el reactor [102]. De manera similar al PE, la pirólisis del PP se puede llevar a cabo con la misma configuración del reactor, pero en un rango de temperatura que no supere los 500 °C, ya que temperaturas más altas generan productos gaseosos que podrían afectar la calidad del aceite obtenido [101].

6.2.3.2 Gasificación

Es una tecnología de conversión que transforma los residuos plásticos, por medio de la quema parcial de estos, en combustibles de hidrocarburos ligeros o gas de síntesis, haciendo uso de altas temperaturas y una cantidad controlada de oxígeno en el ambiente. En este proceso, se obtienen productos gaseosos como monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), y por ende, gas sintético, los cuales pueden usarse para la síntesis química de varios combustibles [103]. A pesar de que se han diseñado diversos procesos de gasificación, el más ampliamente reconocido y utilizado en la industria es el proceso de gasificación de Texaco [104]. La gasificación empleada para el tratamiento de residuos plásticos implica la vaporización de estos polímeros mezclados en diferentes composiciones para generar energía y combustibles; sin embargo, la productividad y el poder calorífico de este proceso es muy bajo debido a la presencia de diversas impurezas, como amoníaco (NH₃), ácido sulfhídrico (H₂S), óxidos de nitrógeno (NOx), entre otros [105].

La gasificación del PE es un proceso costoso, ya que solo puede obtener un alto rendimiento de H₂ a temperaturas muy altas (850-900 °C) en un reactor de lecho, lo que conlleva un bajo rendimiento de alquitrán compuesto de hidrocarburos monoaromáticos [106]. Aunque la gasificación del PP se ha probado con éxito a escala de laboratorio para producir gas sintético, los rendimientos del producto fueron bajos debido al tipo de reactor y la velocidad de fluidización [107].



6.2.3.3 Hidrocraqueo

Es un proceso de hidrogenación y craqueo catalítico en el que se convierten las moléculas de hidrocarburos de cadena larga en moléculas más pequeñas por medio de la adición de hidrógeno a alta presión, y en el que se genera un producto líquido saturado con alto rendimiento. Mientras que la pirólisis produce hidrocarburos insaturados, coque y productos con una amplia distribución de pesos moleculares, el hidrocraqueo convierte moléculas plásticas pesadas en moléculas más ligeras al escindir los enlaces carbono-carbono a través de la hidrogenación de moléculas insaturadas. A pesar de la eficiencia y los productos de alto valor agregado que se obtienen de este proceso, la complejidad de los requisitos químicos —como los catalizadores— limitan la aplicación comercial a gran escala de este proceso [108], [109].

6.3 Incineración

Es un proceso de combustión controlada —con temperaturas entre 850 y 1450 °C— que transforma la fracción orgánica de los residuos sólidos en materiales inertes, como cenizas y gases en plantas termo-valorizadoras [24]. Particularmente, cuando el polímero recibe suficiente calor y rompe la barrera energética, la larga cadena que lo constituye se romperá y producirá radicales libres. La incineración no se considera un sistema de eliminación total, puesto que el proceso origina aproximadamente un 25% de residuos en forma de escoria (cenizas del fondo y ceniza volante), así como gases de escape que se liberan a la atmósfera; sin embargo, reduce aproximadamente el 70% del peso y entre el 80 – 90% del volumen de los desechos originales [98], [110].

Este proceso requiere un alto poder calorífico para permitir que la reacción térmica en cadena y la combustión sean autosostenibles y autotérmicas, es decir, que no se necesite recurrir al uso de otros combustibles. Para asegurar esta combustión, el Poder Calorífico Inferior (PCI) de los residuos debe ser superior a 7 MJ/kg, no obstante, el PCI de los residuos sólidos no separados tiende a estar por debajo de este valor debido al predominio de la fracción orgánica y a un porcentaje de residuos inertes, como cenizas y arena [98], por lo que muchos de estos procesos utilizan combustibles.

La incineración es, en la actualidad, el método de tratamiento térmico más común para la gestión de residuos plásticos; este enfoque se convierte en la opción más adoptada cuando la clasificación o separación de los desechos no resulta económicamente viable. A nivel global, se estima que existen aproximadamente 1179 plantas de incineración de residuos sólidos con una capacidad de tratar diariamente alrededor de 750.000 toneladas de desechos [26], [110]



Entre las ventajas de este proceso está la mínima utilización de terrenos, la posibilidad de tener la planta de incineración cerca del núcleo urbano y el hecho de que esta puede tratar cualquier residuo ajustando el poder calorífico; además, puede adecuarse para la eliminación de fangos de aguas residuales y la producción de calor puede aprovecharse como fuente de energía para el mismo proceso u otros, como el calentamiento de agua y la generación de vapor [24]. Sin embargo, las múltiples desventajas de este proceso generan controversias alrededor de su aplicación. La alta inversión que se requiere para su implementación, costes de operación elevados y una escasa flexibilidad para adaptarse a variaciones estacionales de residuos; además, dado que no es un sistema de eliminación total, se precisa de un relleno para los residuos que este produce. Adicionalmente, la contaminación atmosférica derivada de este proceso es una amenaza para el medio ambiente y la salud humana, ya que se pueden liberar gases tóxicos como dioxinas, monóxido de carbono, furanos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, mercurio y bifenilos policlorados, entre otros. Aunque la mayoría de los problemas asociados a la contaminación atmosférica pueden reducirse con sistemas de depuración de humos, se debe considerar el costo del tratamiento de aguas residuales generales por los residuos en la zona de almacenamiento y cámaras de enfriamiento [26], [61], [111].

6.4 Otros sistemas de gestión de residuos plásticos: sistemas enzimáticos

Considerando las limitaciones inherentes a los métodos no biológicos para la gestión de residuos plásticos, se observa un creciente interés en enfoques innovadores, especialmente aquellos basados en sistemas biológicos que buscan degradar los residuos o transformarlos en productos de alto valor agregado. Los sistemas enzimáticos destinados a la gestión de residuos plásticos implican la utilización de enzimas extracelulares secretadas por diversos organismos, como invertebrados, algas, hongos y bacterias. Estas enzimas interactúan con los polímeros, induciendo la hidrólisis de las cadenas poliméricas y dando lugar a la formación de monómeros y polímeros intermedios más cortos, los cuales pueden ser posteriormente asimilados por las células como fuentes de carbono, liberando gases como el dióxido de carbono en el proceso [26], [112].

Ahora bien, el éxito en la aplicación de sistemas enzimáticos depende de varios factores críticos, como el tipo de enlace presente en la estructura polimérica —ya que los sitios activos de las enzimas son específicos para enlaces particulares—, la cristalinidad del polímero, el pH del medio de degradación, la temperatura, la especificidad de la enzima, los aditivos y otros contaminantes presentes en la matriz del polímero [86]. Actualmente, se adelantan investigaciones sobre la degradación enzimática de la mayoría de los plásticos sintéticos, entre los que se destacan el PE, PP, PVC, PET y poliuretano. Se han desarrollado varios estudios para la gestión de residuos de PE por medio de sistemas enzimáticos de organismos del suelo, lodos residuales y sedimentos marinos, como algas [113], bacterias [114], [115] y hongos [116], [117]. Incluso, en los últimos años se han investigado las capacidades de gusanos y termitas para la despolimerización del PE, y la contribución de su microbiota intestinal en este proceso. Con respecto al polipropileno, se han investigado y probado con éxito comunidades microbianas microaerófilas y cultivos de suelo mixto, el cual, por supuesto, involucra consorcios microbianos [118], [119].



Aunque las investigaciones en este campo están en auge, aún quedan por resolver desafíos técnicos para la implementación de estos sistemas a escala comercial e industrial, tales como la inhibición de la reacción enzimática por metabolitos intermedios, la inestabilidad y pérdida de actividad de la enzima en condiciones no controladas, la acidificación del medio por los productos de la reacción que conduce a la inactivación de la enzima, el número limitado de enzimas y la falta de información estructural de las mismas [86], [112]. Para resolver algunos de estos desafíos, la inteligencia artificial está surgiendo como una posible solución, pues se ha establecido un marco impulsado por el aprendizaje automático que, particularmente en los últimos años, ha demostrado capacidad para predecir el potencial de una enzima particular para la degradación de ciertos plásticos [120].

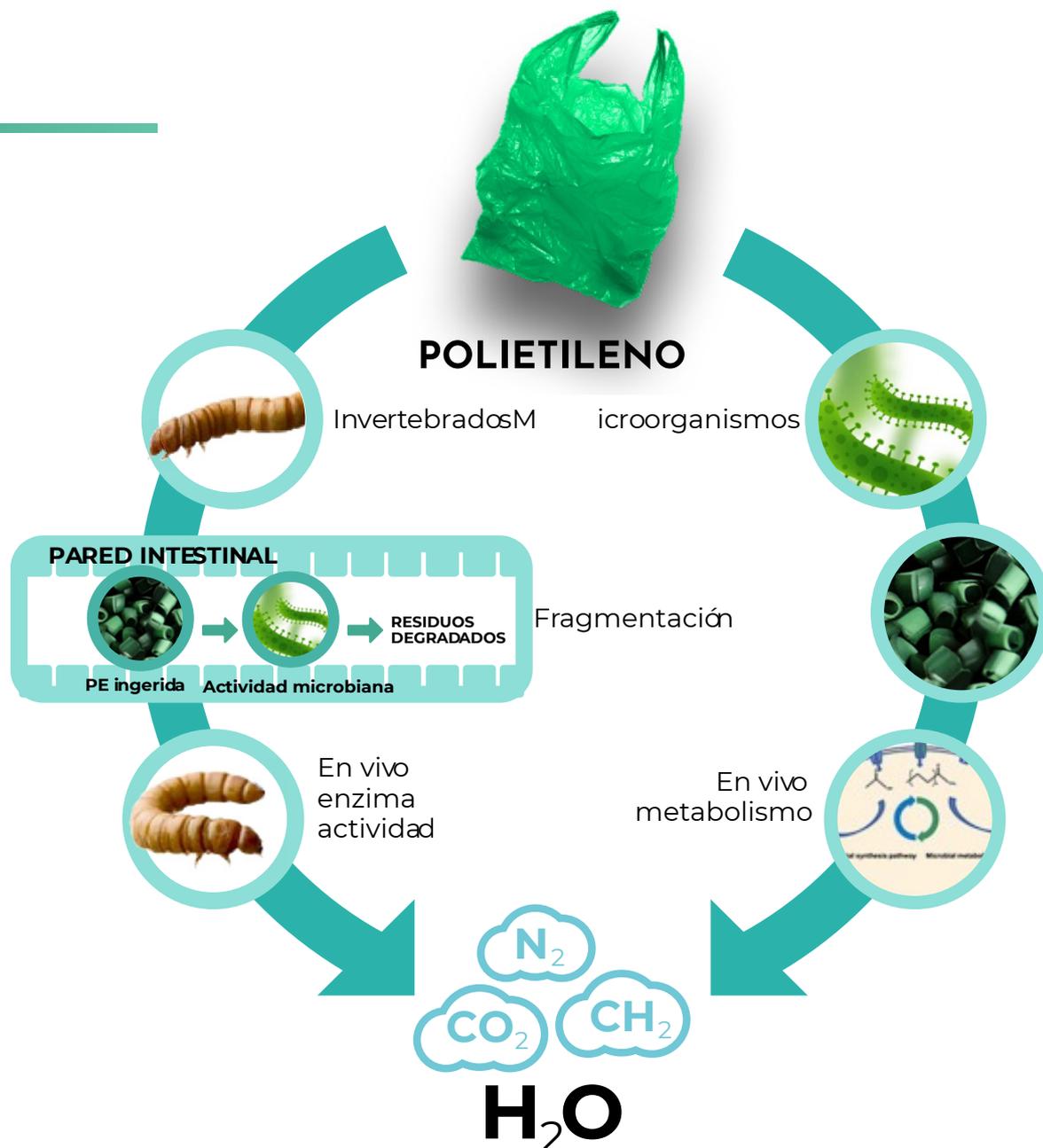


Figura 9. Sistemas enzimáticos para la gestión de residuos de PE [26]

7. DISEÑO DE EMPAQUES SOSTENIBLES

El diseño de empaques sostenibles o ecodiseño se ha convertido en un pilar fundamental para abordar la problemática ambiental en la industria de envasado. La integración de estrategias sostenibles implica considerar múltiples factores, que van desde la selección de materiales adecuados hasta la implementación de técnicas de fabricación que minimicen la huella ambiental. En este contexto, las normativas de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) desempeñan un papel crucial al imponer a los productores la responsabilidad de gestionar los productos al final de su vida útil, lo que incluye envases y empaques [121]. La combinación de estos enfoques impulsa la adopción de prácticas innovadoras en toda la

cadena de suministro. Desde la perspectiva del diseño de empaques sostenibles, la optimización de materiales constituye un punto focal. Esto implica la selección de polímeros reciclables, biodegradables y degradables, como el polietileno y el polipropileno, los cuales, a pesar de sus desafíos de reciclaje, pueden gestionarse eficientemente mediante innovadoras estrategias de recolección y reciclaje. En este sentido, las normativas de REP imponen la obligación de implementar sistemas eficaces de recolección y gestión de residuos, incentivando así a los productores a adoptar diseños que faciliten la recuperación y el reciclaje de los empaques, especialmente aquellos basados en polímeros de difícil degradación. [122]

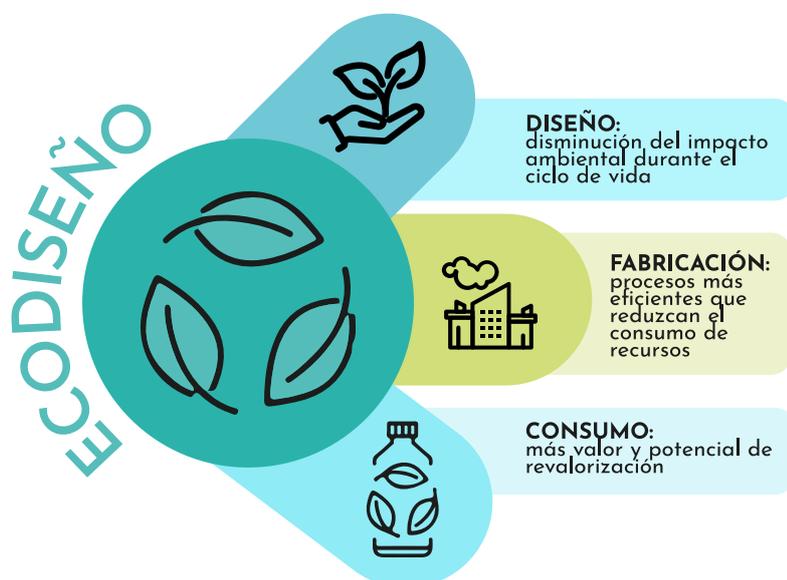


Figura 10:
Aspectos claves
del ecodiseño



Para garantizar la conformidad con las regulaciones de REP, los productores están cada vez más motivados a colaborar con entidades gubernamentales y no gubernamentales para establecer programas de recolección selectiva y centros de reciclaje especializados en polietileno y polipropileno. Estos esfuerzos se centran en optimizar los procesos de clasificación y reciclaje mediante tecnologías avanzadas, lo que asegura la maximización de la recuperación de materiales valiosos y reduce la cantidad de residuos destinados a los vertederos. Además, en la vanguardia de la innovación de la cadena de suministro, se observa un enfoque proactivo en la integración de modelos de economía circular. Esto implica la implementación de sistemas de depósito y retorno, así como la adopción de modelos de negocio que fomentan la reutilización de los empaques, minimizando así la dependencia de la producción de nuevos materiales. La incorporación de tecnologías de vanguardia, como la fabricación aditiva y el desarrollo de bioplásticos de origen renovable, también está revolucionando la forma en que se conciben y producen los empaques sostenibles, abriendo paso a soluciones más eficientes y respetuosas con el medio ambiente [123].

En Europa se ha promovido activamente el uso de empaques sostenibles a través de diversas iniciativas y regulaciones estrictas. Un enfoque destacado ha sido la adopción de empaques compostables y biodegradables para una variedad de productos, incluidos alimentos frescos, para fomentar la reducción de residuos plásticos. Asimismo, se han implementado programas de incentivos y subsidios para fomentar la adopción de tecnologías de fabricación más sostenibles y el uso de materiales reciclados en empaques, promoviendo así una economía circular más sólida y un consumo responsable [124].

En Canadá, se ha prestado una atención significativa al diseño de empaques sostenibles que abordan las necesidades específicas de la biodiversidad y los ecosistemas locales. Esto ha llevado al desarrollo de empaques biodegradables y compostables adaptados a los requisitos climáticos y ecológicos de la región. Además, se han establecido asociaciones entre el gobierno, la industria y las comunidades locales para implementar sistemas avanzados de recolección y reciclaje de empaques, fomentando así una gestión más eficiente de los residuos y una mayor conciencia ambiental [125].

En América Latina, por su parte, ha habido un impulso creciente hacia el diseño de empaques sostenibles que atiendan a las necesidades de la región, con un enfoque particular en la reducción de la huella de carbono y la conservación de los recursos naturales. Esto se ha reflejado en la adopción de empaques biodegradables a base de materiales renovables, como el maíz y la caña de azúcar, en diversas aplicaciones de la industria alimentaria y de productos de consumo. Además, se han implementado programas de educación y sensibilización para promover la participación de la comunidad en la separación y el reciclaje de empaques, con el objetivo de fomentar prácticas sostenibles a nivel local y regional [126].

8. EXPLORANDO LOS BIOPLÁSTICOS: UN VIAJE HACIA LA SOSTENIBILIDAD

El concepto de “bioplásticos” engloba una diversidad de materiales, y en esta sección se explora el creciente campo de los bioplásticos, destacando cómo las innovaciones en materiales pueden proporcionar beneficios ambientales. La definición, ampliamente aceptada por la industria, dice que los “bioplásticos” es que sean “biobasados y/o, de alguna manera, biodegradables (figura 11). Ser biobasado implica que el material proviene, al menos parcialmente, de biomasa, como maíz, caña de azúcar o madera. La biodegradabilidad es un proceso bioquímico en el cual microorganismos convierten materiales en agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2), en un entorno y plazo predefinidos que incluyen compostaje y digestión anaeróbica, así como ambientes marinos y terrestres [127].

BIOPLÁSTICOS

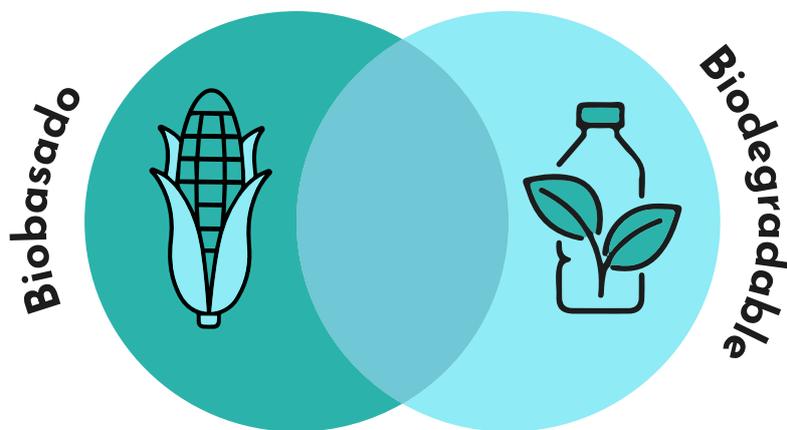


Figura 11: Diagrama sobre el concepto de los Bioplásticos

Un bioplástico biobasado tiene parte o todo su carbono derivado de una fuente renovable, siendo “renovable” definido como un recurso inagotable o fácilmente reemplazable. El contenido biobasado puede estar presente en el polímero, en el relleno o en un aditivo. Además, un material se considera biobasado si es producido en levaduras, bacterias o algas cultivadas con materias primas biológicas, como azúcar o lípidos, siempre y cuando la fuente de carbono en ellos provenga parcial o totalmente de fuentes no fósiles (por ejemplo, no de materias primas, como petróleo o gas natural). En la actualidad, la mayoría de los plásticos biobasados se obtienen de materias primas vegetales tradicionales, como maíz y caña de azúcar, pero la investigación avanza hacia fuentes de segunda y tercera generación, incluyendo residuos agrícolas, forestales y municipales, así como algas y otras materias primas biobasadas no alimenticias. La cantidad de contenido biobasado en un bioplástico se puede informar de varias maneras, dentro de las cuales son comunes el porcentaje del peso contenido de recursos renovables y el porcentaje de carbono biobasado en el bioplástico [128].

Los bioplásticos derivados de polímeros naturales pueden exhibir un rendimiento equivalente a los polímeros de síntesis química, como el polietileno (PE), el tereftalato de polietileno (PET) y diversas poliamidas. A menudo reconocidos como “reemplazos directos” de sus contrapartes fósiles, estos bioplásticos típicamente resultan en una reducción de la huella de carbono en comparación con los materiales basados en fósiles. Los bioplásticos biobasados no compostables ni biodegradables son especialmente adecuados para aplicaciones de larga duración y productos altamente reciclados [129].

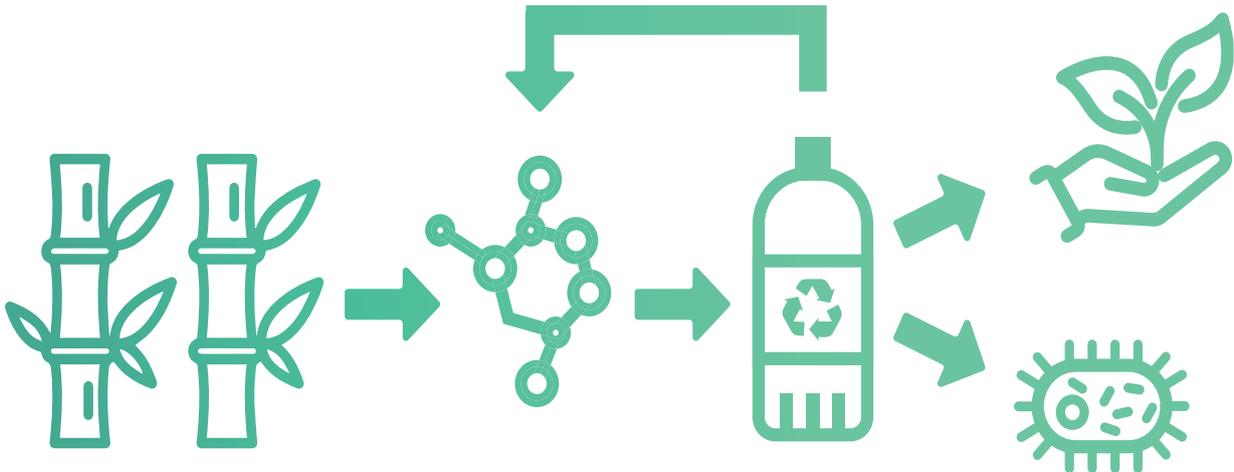


Figura 12: Bioplásticos y sus atributos en sostenibilidad

Existen varios tipos de plásticos biobasados, cada uno con propiedades y aplicaciones específicas. Aquí se presentan algunos de los más importantes [130]:



1. Ácido poliláctico (PLA): proveniente de fuentes renovables, como el almidón de maíz o caña de azúcar, el PLA es biodegradable y se utiliza comúnmente en envases y productos desechables.



4. Polibutileno succinato (PBS): fabricado a partir de ácido succínico, que puede obtenerse de diversas fuentes renovables, el PBS es biodegradable y se utiliza en envases y productos de un solo uso.



2. Polietileno Verde (PE verde): derivado de etanol de caña de azúcar, el PE verde comparte propiedades similares con el polietileno convencional, pero con una menor huella de carbono.



5. Poliésteres polioles (PET biobasado): proveniente de fuentes renovables, como el etanol de caña de azúcar, el PET biobasado es similar al PET convencional, y se utiliza en envases y textiles.



3. Polihidroalcanoatos (PHA): producido por bacterias que consumen materia orgánica, el PHA es biodegradable y se utiliza en aplicaciones como envases y productos médicos.



6. Poliamidas biobasadas: derivadas de fuentes renovables, las poliamidas biobasadas se utilizan en aplicaciones que requieren resistencia y durabilidad, como textiles y piezas de ingeniería.

La capacidad de los plásticos para biodegradarse a través de compostaje industrial u otros métodos ofrece alternativas para la eliminación de productos. A pesar de que algunos plásticos compostables —como el PLA— pueden diseñarse para aplicaciones más resistentes y reciclarse cuando se separan de otros polímeros tradicionales, como PET, HDPE, PP, etc., se espera que a medida que aumente la disponibilidad de PLA en el mercado el reciclaje de este material se vuelva más rentable y despierte un mayor interés. Por otro lado, se emplean “aditivos degradables”, como los oxodegradables, para fragmentar plásticos convencionales en trozos más pequeños, con la afirmación de que estos fragmentos eventualmente se biodegradarán. Sin embargo, la literatura académica revisada por pares no ha demostrado que estos aditivos conviertan polímeros no biodegradables. Ahora bien, expertos en reciclaje, compostaje y gestión de residuos expresan inquietud sobre algunos plásticos, debido a que los productos tratados no cumplirían con sus promesas ambientales, ya que los fragmentos resultantes no están completamente compuestos por materiales naturales conocidos [131].

Los plásticos compostables, una categoría específica dentro de los plásticos biodegradables, se distinguen por su capacidad para descomponerse en compost industrial y no solo por la degradación biológica general. Es esencial destacar que la denominación “plásticos biodegradables” no es intercambiable con la de “plásticos compostables”. En diversas partes del mundo, las bolsas compostables industriales y artículos de servicio de alimentos han desempeñado un papel fundamental en el éxito de los programas de recolección de residuos alimenticios, al aumentar significativamente la cantidad de desechos alimenticios desviados de los vertederos. Aunque la biodegradabilidad y el contenido biobasado son dos características distintas de los bioplásticos, estas no son mutuamente excluyentes. En otras palabras, algunos bioplásticos tienen solo una de estas propiedades —como una botella de agua biobasada que puede reciclarse mecánicamente con PET convencional— mientras otros bioplásticos pueden ser tanto biobasados como biodegradables. Estos bioplásticos permiten al usuario final mejorar la propuesta de valor [132].

La industria de los bioplásticos es un sector joven, innovador y con un enorme potencial económico y ecológico para una bioeconomía circular y baja en carbono que utilice los recursos de manera más eficiente. La Unión Europea ha comenzado a reconocer sus numerosos beneficios y está asignando fondos y recursos a la investigación y desarrollo en este sector. Se prevé que el mercado global de bioplásticos crecerá de manera continua en los próximos años. Según los datos más recientes recopilados por European Bioplastics en colaboración con el nova-Institute, se estima que las capacidades de producción mundial de bioplásticos aumentarán de alrededor de 2.2 millones de toneladas en 2022 a aproximadamente 6.3 millones de





toneladas en 2027 [127]. En este dinámico panorama, es fundamental tener en cuenta que las afirmaciones específicas de las empresas acerca de la inclusión de contenido biobasado y/o la biodegradabilidad de productos deben hacerse con precaución. Esto implica considerar las normas científicas pertinentes, así como las regulaciones y orientaciones federales y estatales aplicables. Especial atención debe prestarse a las “Guías de la Comisión Federal de Comercio de EE. UU. para el uso de afirmaciones de marketing ambiental” (también conocidas como Guías Verdes), que esclarecen la posición de la FTC sobre conceptos como “biodegradabilidad”, “compostabilidad” y otras afirmaciones de degradabilidad. Además, es crucial reconocer que estados y otras jurisdicciones pueden tener requisitos adicionales para el etiquetado y la comercialización de bioplásticos. En este contexto, las empresas que hacen afirmaciones sobre contenido biobasado y/o biodegradabilidad deben respaldar sus afirmaciones con evidencia científica competente y fiable. Además, es posible que se requieran precisiones para garantizar que los consumidores comprendan las afirmaciones y las condiciones en las que se espera que se produzca la degradación. [129]

A pesar de los notables avances y el creciente reconocimiento de los beneficios asociados con los bioplásticos, la brecha de implementación de estos materiales persiste debido a múltiples factores interrelacionados. La disponibilidad de materias primas es un desafío significativo, ya que la producción a gran escala de bioplásticos, especialmente aquellos derivados de cultivos como maíz o caña de azúcar, plantea preocupaciones sobre la competencia con los alimentos y la posible deforestación. Además, el consumo de agua en los cultivos puede ser elevado, y ello suscita interrogantes sobre la verdadera sostenibilidad ambiental de algunos bioplásticos [133].

Además, los aspectos económicos también juegan un papel crucial en la brecha de implementación. Aunque se observa un crecimiento constante en la demanda de bioplásticos, los costos de producción aún pueden ser más altos en comparación con los plásticos tradicionales basados en petróleo. Esto se relaciona con la necesidad de inversiones adicionales en

investigación, tecnología y maquinaria para optimizar los procesos y costos de producción y hacer que los bioplásticos sean más competitivos. Además, la falta de infraestructuras específicas para la gestión de residuos, como instalaciones de compostaje, contribuye a la limitada adopción de bioplásticos. La resistencia al cambio en la cadena de suministro y las prácticas industriales, arraigadas en décadas de dependencia de plásticos convencionales, también ha ralentizado la transición hacia bioplásticos.

A medida que la investigación y el desarrollo continúan abordando estos desafíos, se espera que la brecha de implementación se reduzca. Tanto la innovación en fuentes alternativas de materias primas como unas prácticas agrícolas más sostenibles y las mejoras en la eficiencia de los procesos de fabricación contribuirán a hacer que los bioplásticos sean más accesibles, sostenibles y económicamente viables, y permitirán una transición más eficiente hacia una economía más circular y respetuosa con el medio ambiente [132].



9. CASOS DE ÉXITO

La necesidad de desarrollar procesos de reciclaje más eficientes y sostenibles se ha convertido en un objetivo crítico en la gestión de residuos y la promoción de la economía circular. Para que el reciclaje de polímeros sea verdaderamente sostenible desde un punto de vista económico y ecológico es fundamental abordar dos aspectos claves: el costo de producción y el impacto ambiental [126].

En primer lugar, es esencial que los polímeros reciclados sean competitivos en términos de costo en comparación con los materiales vírgenes. Esto significa que la inversión en tecnologías de reciclaje y los procesos mismos deben ser eficientes y rentables. Si los polímeros reciclados son significativamente más caros de producir que los materiales vírgenes, es poco probable que se utilicen ampliamente en la fabricación de productos, lo que limitaría su impacto positivo en la reducción de la demanda de recursos naturales y la disminución de los residuos [134].

En segundo lugar, para ser considerados ecológicamente sensibles, los procesos de reciclaje deben requerir menos recursos, como energía y agua, en comparación con la producción de materiales vírgenes. Esto es esencial para reducir la huella ambiental y minimizar el consumo de recursos finitos. Además, la reducción de la demanda de recursos naturales contribuye a la mitigación del cambio climático y a la preservación del medio ambiente.

Los ejemplos mencionados, como el proceso Newcycling de APK, el método de Unilever y el proceso STRAP son ejemplos de iniciativas y tecnologías que buscan abordar estos desafíos. Estos procesos están diseñados para separar eficazmente los materiales multicapa, como los envases, y recuperar los polímeros valiosos contenidos en ellos, como el PET. Además, el proceso STRAP ha demostrado una reducción significativa del 37% en el consumo de energía en comparación con la producción de PET virgen [123].

9.1.1 Newcycling



La tecnología Newcycling® APK es un proceso basado en solventes que permite la separación selectiva de polímeros en residuos plásticos mixtos. El resultado son gránulos puros que tienen propiedades similares a las del plástico virgen. De esta manera, se otorga a los envases una segunda vida en su aplicación original [135]



Newcycling® es una tecnología innovadora que destaca por su capacidad para obtener plásticos de alta calidad a partir de fuentes de residuos complejas. Lo que la distingue es su enfoque basado en solventes, que permite producir gránulos de plástico puro con propiedades similares a las de los plásticos vírgenes. Esta tecnología es particularmente efectiva en el manejo de flujos de residuos desafiantes, como los de plásticos mixtos y envases multicapa.

Una de las ventajas clave de Newcycling® radica en su eficiencia económica y ecológica. A diferencia del reciclaje químico tradicional, donde el plástico debe ser

repolimerizado mediante procesos costosos en energía y recursos, Newcycling® conserva el plástico existente, lo que resulta en un proceso más sostenible y rentable. En contraste con los procesos de reciclaje mecánico convencionales, que a menudo solo producen regránulos de calidad adecuada para aplicaciones de reciclaje descendente, Newcycling® destaca como una solución que permite cerrar el ciclo de manera eficaz, contribuyendo así a la conservación de recursos y la reducción de residuos plásticos [135].

En conjunto, estos esfuerzos y tecnologías representan avances importantes para lograr una economía más circular y sostenible en la cual los recursos se utilicen de manera más eficiente y se minimice el impacto ambiental de la producción de polímeros. Esto es fundamental para abordar los desafíos ambientales y económicos relacionados con la gestión de los residuos plásticos y la promoción de prácticas más sostenibles en la industria.



9.2 Repensando el empaquetado de plástico



En un mundo donde el plástico desempeña un papel vital en la seguridad y eficiencia de la distribución de productos, se enfrenta a un desafío crucial: su impacto en el entorno natural. La necesidad de reducir el uso de plástico virgen y repensar por completo las estrategias de empaquetado se ha vuelto imperativa. La estrategia de Unilever “Repensando el empaquetado de plástico”, se centra en explorar soluciones innovadoras para hacer frente a la contaminación plástica, y hace hincapié en la importancia de adoptar compromisos sólidos respaldados por cambios a nivel de sistemas, como la implementación de políticas de Responsabilidad Extendida al Productor (REP). Además, aboga por la urgente necesidad de un tratado global respaldado por la ONU con metas concretas y de obligado cumplimiento para abordar este desafío mundial [136].

En línea con su compromiso de reducir el impacto ambiental, han adoptado un enfoque integral hacia la gestión de plásticos: “Menos plástico. Mejor plástico. Sin plástico”. Esta filosofía ha impulsado sus

acciones en la dirección correcta, lo que ha resultado en un caso de éxito significativo. A través de la implementación de estrategias innovadoras, han logrado reducir nuestra huella de plástico virgen en un notable 13% desde 2019.

Su enfoque de “menos plástico” se ha llevado a cabo mediante la introducción de diseños más livianos, opciones de reutilización y productos concentrados que requieren menos embalaje. Además, han fortalecido su compromiso con el concepto de “Mejor plástico” garantizando que el plástico utilizado sea completamente reciclable y que sus productos incorporen materiales reciclados. Además, a través de iniciativas enfocadas en la eliminación del plástico, han implementado estaciones de recarga y alternativas de envasado para eliminar completamente el uso de plástico nuevo. Además, han avanzado hacia el uso de materiales de embalaje sostenibles, como papel, vidrio y aluminio.

Este logro no solo refuerza su compromiso con la sostenibilidad, sino que también ejemplifica la viabilidad y efectividad de su enfoque multifacético en la gestión responsable de los materiales plásticos. Continuarán innovando y mejorando sus prácticas con el objetivo de alcanzar aún más avances en la reducción de residuos plásticos y la promoción de un entorno más sostenible para las generaciones futuras. [136]

Sus objetivos son claros: reducir a la mitad la cantidad de plástico virgen utilizado en el empaquetado, lo que se traducirá en una reducción absoluta de más de 100.000 toneladas; recolectar y procesar más empaques de plástico de los que venden; garantizar que el 100% del empaquetado de plástico esté diseñado para ser completamente reutilizable, reciclable o compostable y utilizar un 25% de plástico reciclado en el empaquetado. Estas metas demuestran el firme compromiso con la reducción de residuos plásticos y la promoción de prácticas de embalaje más sostenibles.

**IMPECCABLE CLEANING,
PLASTIC FREE PACKAGING**



9.3 Walmart: “Menos plástico. Mejor plástico. Sin plástico”



Walmart es una empresa minorista estadounidense y una de las mayores del mundo. A lo largo de los años, Walmart ha implementado diversas estrategias para mejorar su sostenibilidad y reducir su huella de carbono. Uno de sus casos de éxito notables es su enfoque innovador en el embalaje y la gestión de residuos plásticos.

Bajo el lema “Menos plástico. Mejor plástico. Sin plástico”, Walmart ha logrado reducir considerablemente la cantidad de plástico utilizado en sus operaciones comerciales. Han implementado cambios significativos, como la introducción de envases más ligeros, la promoción de formatos de reutilización y relleno, y la adopción de productos concentrados

que requieren menos envoltorios. Además, han trabajado para garantizar que el plástico utilizado en sus productos sea reciclable y han aumentado significativamente el uso de materiales de plástico reciclado en sus productos y envases.

Además, Walmart ha adoptado una postura proactiva en la eliminación del uso de plástico nuevo, implementando estaciones de recarga y promoviendo formatos alternativos que evitan su uso. Han realizado una transición exitosa hacia materiales de embalaje más sostenibles, como papel, vidrio y aluminio, reduciendo así su dependencia del plástico y promoviendo prácticas más ecológicas en toda su cadena de suministro [136].

Este caso de éxito de Walmart no solo ha demostrado la viabilidad de adoptar prácticas sostenibles en una gran empresa minorista, sino que también ha establecido un ejemplo sólido para otras empresas del sector. Su enfoque integral y su compromiso continuo con la sostenibilidad ambiental han resultado fundamentales para lograr un impacto positivo y duradero en la gestión responsable de los residuos plásticos y en la protección del medio ambiente para las generaciones futuras. [136].



9.4 Un diseño de botella de bebida reutilizable para múltiples marcas: botella universal



La botella universal de Coca-Cola es una botella de plástico reutilizable (PET) que se puede utilizar en múltiples marcas de refrescos en América Latina. Cuando un consumidor termina una bebida, puede devolver la botella al punto de venta donde el productor recoge las botellas vacías para rellenarlas y reutilizarlas. En promedio, estas botellas se reutilizan hasta 25 veces más, reduciendo el uso general de plástico en un 90%. Presentado por Coca-Cola Company y sus socios embotelladores en 2018, es su formato de envase de más rápido crecimiento, y ahora se está escalando a otros continentes [137].

La botella universal es un ejemplo de “innovación en el origen”: rastrear un problema hasta su causa raíz y abordarlo allí. Significa que, en lugar de centrarnos únicamente en cómo tratar el material recuperable que se convierte en residuos, trabajamos para mantener ese envase en uso durante el mayor tiempo posible.



Puntos claves que hacen de esta iniciativa un caso de éxito:

Sostenibilidad: la conciencia ambiental está en aumento, y los consumidores están más dispuestos que nunca a apoyar marcas que adopten prácticas sostenibles. Una botella reutilizable que reduzca el desperdicio de plástico y fomente un consumo responsable podría ganar una sólida base de seguidores.

Diseño innovador: una botella universal debe tener un diseño atractivo y funcional, así como fácil de personalizar para diferentes marcas. Un enfoque minimalista y versátil podría resultar atractivo para una amplia gama de empresas.

Colaboraciones estratégicas: las alianzas con diversas marcas para promover el uso de una botella universal podrían expandir su alcance y aumentar su popularidad. Esto también podría fomentar asociaciones entre competidores en beneficio del medio ambiente.

Tecnología de seguimiento: la integración de tecnología para rastrear el uso y la reutilización de las botellas podría fomentar la transparencia y fortalecer la confianza del consumidor en el impacto positivo que están teniendo al optar por una opción reutilizable.

Estrategia de marketing sólida: la educación del consumidor y la promoción de los beneficios ambientales y económicos de una botella reutilizable universal serían fundamentales para su aceptación generalizada. Campañas de concienciación y *marketing* creativas podrían ser clave para el éxito.

Al combinar estos elementos con una ejecución cuidadosa y un enfoque estratégico, una botella de bebida reutilizable para múltiples marcas podría convertirse en un caso de éxito notable en la industria de bebidas y empaques [137].





9.5 Enka: transformación e innovación



Enka es una empresa colombiana dedicada a la producción de resinas y fibras sintéticas reconocida como líder en el reciclaje de botellas PET posconsumo a nivel nacional. Es el principal productor de lona para llantas de nylon 6 en América, y uno de los principales fabricantes en Latinoamérica de filamentos y fibras sintéticas; contando con una planta que tiene la capacidad de reciclar 24.000 toneladas anuales de botellas PET, lo que la convierte en uno de los mayores transformadores de envases de PET posconsumo en el mundo. Por medio de una propuesta de valor agregado, sostenibilidad, innovación y alta ingeniería, ENKA ha desarrollado cuatro líneas de negocios verdes entre las que se encuentran EKO PET, en la que utiliza resinas para la fabricación de envases en contacto con alimentos; EKO Poliolefinas, en la que cierran el ciclo de las botellas, transformando las tapas y etiquetas en resinas de HDPE y

PP para uso en autopartes e inyección de piezas; EKO Fibras, en la que usan las fibras de poliéster reciclado en la elaboración de no-tejidos técnicos, guatas y rellenos; y EKO Filamentos, que desarrolla microfibras para la producción de tejidos de punto y plano. Además, ENKA cuenta con la mayor red de recolección de envases de PET posconsumo, la cual, gestionada por Eko Red, tiene presencia en más de 900 municipios en Colombia, 700 centros de acopio aliados y 4 centros de acopio propios. ENKA aporta a la transición hacia una economía circular por medio de estrategias que reducen el uso de productos derivados del petróleo mediante la elaboración de productos a partir del reciclaje de botellas PET, sus tapas y etiquetas. Con esta estrategia, en el 2020 el 52% de los productos de esta empresa se elaboró a partir de materias primas recicladas, y recuperaron 895 millones de botellas de PET [138].

10. CONCLU- SIONES



La contaminación causada por los plásticos, particularmente por el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), los polímeros más utilizados y con mayores proyecciones de crecimiento, es un desafío ambiental significativo que afecta la salud de los ecosistemas y la vida humana. La creciente demanda de plásticos de un solo uso, junto con una gestión inadecuada, ha llevado a la acumulación de residuos y, por consiguiente, a la liberación de micro y nanoplásticos en entornos acuáticos y terrestres, lo que genera impactos negativos en la biodiversidad y amenaza la salud humana y la seguridad alimentaria. Abordar este problema requiere un enfoque integral que incluya la reconsideración del diseño de envases y embalajes mediante el uso de modelos sostenibles, la reducción de la producción de plásticos a partir de materias primas como los hidrocarburos, la disminución del consumo de plásticos vírgenes y la mejora de la gestión de residuos mediante la adopción de alternativas sostenibles.

Las tecnologías de reciclaje de plásticos desempeñan un papel crucial en la mitigación de la contaminación plástica y en la transición hacia una economía circular. El reciclaje mecánico resulta apropiado para residuos homogéneos, donde la separación y clasificación son viables, permitiendo la obtención de nuevos productos plásticos destinados a aplicaciones que no requieren una alta calidad. Por otro lado, el reciclaje terciario se presenta como la opción más adecuada para aplicaciones exigentes y mezclas de diferentes plásticos, ya que descompone los materiales en sus monómeros constituyentes, facilitando la fabricación de productos con alto valor agregado; y la incineración debería reservarse únicamente para casos en los que el reciclaje por otros métodos no sea factible.

A pesar de los avances en este campo, el alto costo asociado con las tecnologías de reciclaje terciario y basadas en sistemas biológicos limita su adopción, lo que lleva a que muchos países dependan predominantemente del reciclaje mecánico, la incineración y los vertederos. Por lo tanto, es imperativo que el desarrollo de nuevas tecnologías tenga en cuenta el contexto social y económico. Es decir, el diseño de la viabilidad técnica debería contemplar la escalabilidad del sistema y, por ende, su viabilidad económica, comercial e industrial.

La magnitud del problema relacionado con el consumo y gestión de plásticos a nivel mundial, es innegable la necesidad de una acción inmediata y coordinada. El aumento exponencial en la producción y generación de residuos plásticos ha desencadenado una crisis ambiental sin precedentes, resaltando la urgencia de repensar nuestras prácticas de producción y consumo. La baja tasa de reciclaje, la significativa acumulación de residuos plásticos en entornos naturales y su filtración masiva en océanos y ríos indican un impacto ambiental irreversible que demanda una respuesta global.

La propuesta de armonización de enfoques de diseño y regulación, respaldada por una gestión internacional de residuos y la necesidad de inversiones considerables, subraya la magnitud del desafío. La aplicación del Análisis del Ciclo de Vida y la adopción de prácticas como el ecodiseño emergen como pasos esenciales para abordar la crisis de los residuos plásticos, destacando la importancia de un compromiso sostenido y una colaboración global para construir un futuro más sostenible.



A continuación, se describen las brechas más importantes identificadas en el componente tecnológico y ecológico:

Tabla 1. Matriz de brechas del componente tecnológico y ecológico

| OBJETIVO DESEADO | SITUACIÓN ACTUAL | BRECHA |
|---|--|---|
| <p>Implementar regulaciones ambientales específicas y detalladas que aborden la presencia de micro y nanoplasticos en rellenos sanitarios, tales como límites de concentración, métodos de monitoreo y evaluación de riesgos ambientales asociados con la liberación de estos.</p> | <p>A pesar del impacto para el ambiente y la salud humana de los micro y nanoplasticos, estos no figuran como contaminantes en las regulaciones de los rellenos sanitarios.</p> | <p>Falta de regulaciones específicas que aborden la presencia, gestión y liberación de micro y nanoplasticos en rellenos sanitarios. Además, para llevar a cabo estas regulaciones se requiere de estudios plurianuales que analicen y reporten públicamente el impacto de estos sobre el ambiente y los cambios que estos sufren en el tiempo.</p> |
| <p>Implementar a escala industrial métodos de reciclaje terciario basados en sistemas biológicos que puedan integrarse de manera efectiva a la gestión de residuos a nivel mundial.</p> | <p>A pesar de los avances en las tecnologías de reciclaje, muchas de estas técnicas solo se han probado en ambientes con condiciones controladas o condiciones relevantes. Además, se enfrentan a desafíos relacionados con la eficiencia, escalabilidad y rentabilidad, lo que limita su aplicabilidad en contextos más amplios.</p> | <p>Es imperativo emprender una acción coordinada que involucre a los sectores público, privado y académico, tanto en la orientación como en el financiamiento de investigaciones y avances relacionados con técnicas de reciclaje que consideren cuidadosamente la viabilidad económica e industrial del desarrollo, así como su impacto de acuerdo con la magnitud de la problemática de los plásticos.</p> |
| <p>Implementar tecnologías efectivas y sostenibles para la gestión de residuos plásticos.</p> | <p>La mayoría de los procesos que se utilizan y desarrollan para la gestión de residuos plásticos enfrentan desafíos significativos de sostenibilidad, ya que tienen bajos rendimientos, altos costos, y liberación de productos y subproductos que pueden contribuir a la contaminación atmosférica.</p> | <p>Se requiere diseñar y desarrollar tecnologías efectivas y sostenibles que puedan cuantificar el impacto ambiental y a la salud humana a escala industrial.</p> |
| <p>Establecer indicadores claves de rendimiento estandarizados a nivel global, que además sirvan como métrica cuantitativa para evidenciar el avance de cada país hacia sus objetivos individuales en materia de circularidad y sostenibilidad de los plásticos.</p> | <p>Aunque actualmente se encuentran cifras que respaldan la gestión y reciclaje del plástico en diferentes países, éstas no se están globalmente armonizadas y alineadas, lo que dificulta su interpretación y comparación, que permita definir planes de acción más estratégicos, basados en una comprensión clara y global de la situación.</p> | <p>Es necesario establecer indicadores clave de rendimiento estandarizados a nivel global que posibiliten una comprensión completa y global de la situación y la gestión de los plásticos en términos de circularidad y sostenibilidad.</p> |
| <p>Implementar los principios del ecodiseño y la generación de plásticos biobasados con el objetivo de eliminar la toxicidad, reducir la contaminación y minimizar la generación de residuos y la conservación de materiales; para disminuir la dependencia de materias primas vírgenes y derivados del petróleo en la industria de los plásticos.</p> | <p>En la actualidad, se desarrollan iniciativas e investigación en ecodiseño y obtención de plásticos biobasados; sin embargo, esto aún no es suficiente para reemplazar los plásticos provenientes del petróleo o de materias primas vírgenes provenientes de fuentes no renovables. Esto es debido a la necesidad de inversiones adicionales en investigación, tecnología y maquinaria para optimizar los procesos de producción y hacer que los bioplásticos sean más competitivos. Hay resistencia al cambio en la cadena de suministro y las prácticas industriales.</p> | <p>Avanzar en la transferencia tecnológica de la innovación en fuentes alternativas de materias primas, prácticas agrícolas más sostenibles y mejoras en la eficiencia de los procesos de fabricación de los plásticos biobasados a partir del ecodiseño para que estos sean más accesibles, sostenibles y económicamente viables. Esto facilitará una transición más eficiente hacia una economía más circular.</p> |



11. BIBLIOGRAFÍA

[1] OECD. Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060 [Internet]. OECD; 2022. Disponible en: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_aa1edf33-endoi:10.1787/AA1EDF33-EN.

[2] Gerassimidou S, Geueke B, Groh KJ, Muncke J, Hahladakis JN, Martin OV, et al. Unpacking the complexity of the polyethylene food contact articles value chain: A chemicals perspective. *Journal of Hazardous Materials*. 2023; 454:131422.

[3] Statista. Polyethylene market volume worldwide 2015-2030 (in million metric tons) [Internet]. Statista; 2023. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/1245162/polyethylene-market-volume-worldwide/>

[4] Association of Plastic Manufacturers. Plastics – the Facts 2020. An analysis of European plastics production, demand, and waste data [Internet]. Plastics Europe; 2020 p. 64. Disponible en: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>.

[5] Verified Market Research. Polyethylene Packaging Market Size and Forecast [Internet]. 2022 p. 202. Disponible en: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/polyethylene-packaging-market/>

[6] Ronca S. Polyethylene. En: *Brydson's Plastics Materials* [Internet]. 8.ª ed. Elsevier; 2017. p. 247-78. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323358248000104>

[7] Zhong X, Zhao X, Qian Y, Zou Y. Polyethylene plastic production process. *Insight - Material Science*. 9 de agosto de 2018;1(1):1-11.

[8] Doğan F. Polypropylene. Rijeka: InTech; 2012.

[9] Statista. Polypropylene global market volume 2015-2030 (in million metric tons) [Internet]. Statista; 2023. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/1245169/polypropylene-market-volume-worldwide/>

[10] Verified Market Research. Cast Polypropylene Packaging Films Market Size and Forecast [Internet]. 2023 p. 202. Disponible en: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/cast-polypropylene-packaging-films-market/>

[11] Amaya EM, Molina FE, Sánchez ME. Producción de Polipropileno [Internet]. [Mendoza]: Universidad Nacional de Cuyo; 2018. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/186628957.pdf>.

- [12] Kan M, Miller SA. Environmental impacts of plastic packaging of food products. Resources, Conservation and Recycling. Mayo de 2022;180:106156.
- [13] Bustos Gómez LM, González Clavijo LN. Formulación de una propuesta de gestión de residuos de polietileno de baja densidad. Caso de estudio: empresa dedicada a la importación de alimentos [Internet] [Tesis de grado]. [Caldas]: Universidad de La Salle; 2021. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1918/
- [14] Bustos Gómez LM, González Clavijo LN. Formulación de una propuesta de gestión de residuos de polietileno de baja densidad. Caso de estudio: empresa dedicada a la importación de alimentos [Internet] [Tesis de grado]. [Caldas]: Universidad de La Salle; 2021. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1918/
- [15] Miranda D. 20 datos sobre el problema del plástico en el mundo [Internet]. National Geographic; 2023. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo_15282
- [16] Fuller R, Landrigan PJ, Balakrishnan K, Bathan G, Bose-O'Reilly S, Brauer M, et al. Pollution and health: a progress update. The Lancet Planetary Health. Junio de 2022;6(6):535-47.
- [17] Ncube LK, Ude AU, Ogunmuyiwa EN, Zulkifli R, Beas IN. An Overview of Plastic Waste Generation and Management in Food Packaging Industries. Recycling. 12 de febrero de 2021;6(1):12.
- [18] Rodrigues MO, Abrantes N, Gonçalves FJM, Nogueira H, Marques JC, Gonçalves AMM. Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: What is known? Environmental Toxicology and Pharmacology. Noviembre de 2019;72:103239.
- [19] Mierzwa-Hersztek M, Gondek K, Kopeć M. Degradation of Polyethylene and Biocomponent-Derived Polymer Materials: An Overview. J Polym Environ. Marzo de 2019;27(3):600-11.
- [20] Pajak J, Nowak B, Labuzek S. Biodegradacja wybranych polimerów syntetycznych. Problemy Ekologii. 2009;13(3).
- [21] Jeon JM, Park SJ, Choi TR, Park JH, Yang YH, Yoon JJ. Biodegradation of polyethylene and polypropylene by *Lysinibacillus* species JJY0216 isolated from soil grove. Polymer Degradation and Stability. September de 2021;191:109662.
- [22] Oberoi G, Garg A. Single-Use Plastics: A Roadmap for Sustainability? Supremo Amicus. 2021;24:585.
- [23] Environment Programme. Our planet is choking on plastic [Internet]. 2023. Disponible en: <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution/>
- [24] Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud Pública. Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en el medio ambiente. Bogotá: Greenpeace Colombia; 2019.
- [25] Huerta Lwanga E, Mendoza Vega J, Ku Quej V, Chi JDLA, Sanchez Del Cid L, Chi C, et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. Scientific Reports. 26 de octubre de 2017;7(1):14071.



- [26] Yao Z, Seong HJ, Jang YS. Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Septiembre de 2022;242:113933.
- [27] Garcés-Ordóñez O, Saldarriaga-Vélez JF, Espinosa-Díaz LF, Patiño AD, Cusba J, Canals M, et al. Microplastic pollution in water, sediments and commercial fish species from Ciénaga Grande de Santa Marta lagoon complex, Colombian Caribbean. *Science of The Total Environment*. Julio de 2022;829:154643.
- [28] Horton AA, Barnes DKA. Microplastic pollution in a rapidly changing world: Implications for remote and vulnerable marine ecosystems. *Science of The Total Environment*. Octubre de 2020;738:140349.
- [29] Ng EL, Huerta Lwanga E, Eldridge SM, Johnston P, Hu HW, Geissen V, et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment*. Junio de 2018;627:1377-88.
- [30] Hernandez LM, Yousefi N, Tufenkji N. Are There Nanoplastics in Your Personal Care Products? *Environmental Science & Technology Letters*. 11 de julio de 2017;4(7):280-5.
- [31] Murphy M. Microplastics Expert Workshop Report [Internet]. Environmental Protection Agency; 2017. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-03/documents/microplastics_expert_workshop_report_final_12-4-17.pdf
- [32] Directorio de Ambiente. Series de prueba y evaluación N.º 243. 2017.
- [33] Kumar P. Role of Plastics on Human Health. *The Indian Journal of Pediatrics*. Mayo de 2018;85(5):384-9.
- [34] Santos D, Luzio A, Bellas J, Monteiro SM. Microplastics- and copper-induced changes in neurogenesis and DNA methyltransferases in the early life stages of zebrafish. *Chemico-Biological Interactions*. Agosto de 2022;363:110021.
- [35] Poma AMG, Morciano P, Aloisi M. Beyond genetics: can micro and nanoplastics induce epigenetic and gene-expression modifications? *Frontiers in Epigenetics and Epigenomics*. 21 de agosto de 2023;1:1241583.
- [36] Hahladakis JN, Velis CA, Weber R, Iacovidou E, Purnell P. An overview of chemical additives presents in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal, and recycling. *Journal of Hazardous Materials*. febrero de 2018;344:179-99.
- [37] Canopoli L, Fidalgo B, Coulon F, Wagland ST. Physico-chemical properties of excavated plastic from landfill mining and current recycling routes. *Waste Management*. Junio de 2018;76:55-67.
- [38] Iskander SM, Brazil B, Novak JT, He Z. Resource recovery from landfill leachate using bioelectrochemical systems: Opportunities, challenges, and perspectives. *Bioresource Technology*. Febrero de 2016;201:347-54.



- [39] Tiwari N, Santhiya D, Sharma JG. Microbial remediation of micro-nano plastics: Current knowledge and future trends. *Environmental Pollution*. Octubre de 2020;265:115044.
- [40] Hariharan G, Purvaja R, Anandavelu I, Robin RS, Ramesh R. Accumulation and ecotoxicological risk of weathered polyethylene (wPE) microplastics on green mussel (*Perna viridis*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Enero de 2021;208:111765.
- [41] Ory NC, Sobral P, Ferreira JL, Thiel M. Amberstripe scad *Decapterus muroadsi* (Carangidae) fish ingest blue microplastics resembling their copepod prey along the coast of Rapa Nui (Easter Island) in the South Pacific subtropical gyre. *Science of The Total Environment*. Mayo de 2017;586:430-7.
- [42] De Guzman MC, Chua PAP, Sedano FS. Embryotoxic and teratogenic effects of polyethylene microbeads found in facial wash products in Zebrafish (*Danio rerio*) using the Fish Embryo Acute Toxicity Test [Internet]. *Developmental Biology*; 2020. Disponible en: <http://biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/2020.09.16.299438>
- [43] Hüffer T, Metzelder F, Sigmund G, Slawek S, Schmidt TC, Hofmann T. Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil. *Science of The Total Environment*. Marzo de 2019;657:242-7.
- [44] Silva CJm, Patrício Silva AL, Campos D, Soares AMvm, Pestana J, Gravato C. *Lumbriculus variegatus* (oligochaeta) exposed to polyethylene microplastics: biochemical, physiological, and reproductive responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Enero de 2021;207:111375.
- [45] Jemec Kokalj A, Dolar A, Drobne D, Marinšek M, Dolenc M, Škrlep L, et al. Environmental hazard of polypropylene microplastics from disposable medical masks: acute toxicity towards *Daphnia magna* and current knowledge on other polypropylene microplastics. *Microplastics and Nanoplastics*. Diciembre de 2022;2(1):1.
- [46] Alsabri A, Tahir F, Al-Ghamdi SG. Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. *Materials Today: Proceedings*. 2022;56:2245-51.
- [47] Atabay D, Rosentrater KA, Ghnimi S. The sustainability debate on plastics: Cradle to grave Life Cycle Assessment and Techno-Economical Analysis of PP and PLA polymers with a "Polluter Pays Principle" perspective. *Frontiers in Sustainability*. 16 de septiembre de 2022;3:931417.
- [48] Organización Mundial de la Salud. Las dioxinas y sus efectos en la salud humana [Internet]. Organización Mundial de la Salud; 2023. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health#>
- [49] Jeyavani J, Sibiya A, Shanthini S, Ravi C, Vijayakumar S, Rajan DK, et al. A Review on Aquatic Impacts of Microplastics and Its Bioremediation Aspects. *Current Pollution Reports*. Septiembre de 2021;7(3):286-99.
- [50] Yedier S, Yalçinkaya SK, Bostancı D. Exposure to polypropylene microplastics via diet and water induces oxidative stress in *Cyprinus carpio*. *Aquatic Toxicology*. Junio de 2023;259:106540.



- [51] Cao Y, Ma X, Chen N, Chen T, Zhao M, Li H, et al. Polypropylene microplastics affect the distribution and bioavailability of cadmium by changing soil components during soil aging. *Journal of Hazardous Materials*. Febrero de 2023;443:130079.
- [52] OECD. Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management [Internet]. Paris: OECD; 2016. Disponible en: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/extended-producer-responsibility_9789264256385-en
- [53] OECD. Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060 [Internet]. OECD; 2022. Disponible en: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_aaledf33-en
- [54] Epps TH, Korley LTJ, Yan T, Beers KL, Burt TM. Sustainability of Synthetic Plastics: Considerations in Materials Life-Cycle Management. *JACS Au*. 24 de enero de 2022;2(1):3-11.
- [55] Koinig G, Grath E, Barretta C, Friedrich K, Vollprecht D, Oreski G. Lifecycle Assessment for Recycling Processes of Monolayer and Multilayer Films: A Comparison. *Polymers*. 1 de septiembre de 2022;14(17):3620.
- [56] Maga D, Hiebel M, Aryan V. A Comparative Life Cycle Assessment of Meat Trays Made of Various Packaging Materials. *Sustainability*. 26 de septiembre de 2019;11(19):5324.
- [57] Rodrigues MO, Abrantes N, Gonçalves FJM, Nogueira H, Marques JC, Gonçalves AMM. Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: What is known? *Environmental Toxicology and Pharmacology*. Noviembre de 2019;72:103239.
- [58] Reinales D, Zambrana-Vasquez D, Saez-De-Guinoa A. Social Life Cycle Assessment of Product Value Chains Under a Circular Economy Approach: A Case Study in the Plastic Packaging Sector. *Sustainability*. 18 de agosto de 2020;12(16):6671.
- [59] Grigore M. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling*. 28 de noviembre de 2017;2(4):24.
- [60] Ritchie H, Samborska V, Roser M. Our World in Data. Plastic Pollution. Disponible en: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
- [61] Rondón Toro E, Szanto Narea M, Pacheco JF, Contreras E, Gálvez A. Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios [Internet]. Santiago de Chile: Cepal; 2016. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40407-guia-general-la-gestion-residuos-solidos-domiciliarios>
- [62] Wojnowska-Baryła I, Bernat K, Zaborowska M. Plastic Waste Degradation in Landfill Conditions: The Problem with Microplastics, and Their Direct and Indirect Environmental Effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 14 de octubre de 2022;19(20):13223.
- [63] Zhou C, Fang W, Xu W, Cao A, Wang R. Characteristics, and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. *Journal of Cleaner Production*. Octubre de 2014;80:80-6.



- [64] Sun J, Zhu ZR, Li WH, Yan X, Wang LK, Zhang L, et al. Revisiting Microplastics in Landfill Leachate: Unnoticed Tiny Microplastics and Their Fate in Treatment Works. *Water Research*. Febrero de 2021;190:116784.
- [65] Kazour M, Terki S, Rabhi K, Jemaa S, Khalaf G, Amara R. Sources of microplastics pollution in the marine environment: Importance of wastewater treatment plant and coastal landfill. *Marine Pollution Bulletin*. Septiembre de 2019;146:608-18.
- [66] K MB, Natesan U, R V, R PK, R R, S S. Spatial distribution of microplastic concentration around landfill sites and its potential risk on groundwater. *Chemosphere*. Agosto de 2021;277:130263.
- [67] Borthakur A, Singh P. India's lost rivers and rivulets. *Energy, Ecology and Environment*. Octubre de 2016;1(5):310-4.
- [68] United States Environmental Protection Agency (EPA). Landfill Methane Outreach Program (LMOP). 2023. Basic Information about Landfill Gas. Disponible en: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>
- [69] Siddiqua A, Hahladakis JN, Al-Attia WAKA. An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental Science and Pollution Research*. Agosto de 2022;29(39):58514-36.
- [70] United Nations Environment Programme, Climate & Clean Air Coalition. Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. Mayo de 2021.
- [71] Arvanitoyannis IS, Kasaveti A. Consumer attitude to food packaging and the market for environmentally compatible products. En: *Environmentally Compatible Food Packaging* [Internet]. Elsevier; 2008. p. 161-81. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845691943500076>
- [72] Hopewell J, Dvorak R, Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 27 de julio de 2009;364(1526):2115-26.
- [73] Singh N, Hui D, Singh R, Ahuja IPS, Feo L, Fraternali F. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*. Abril de 2017;115:409-22.
- [74] Atabay D, Rosentrater KA, Ghnimi S. The sustainability debate on plastics: Cradle to grave Life Cycle Assessment and Techno-Economical Analysis of PP and PLA polymers with a "Polluter Pays Principle" perspective. *Frontiers in Sustainability*. 16 de septiembre de 2022;3:931417.
- [75] Al-Salem SM, Lettieri P, Baeyens J. Recycling, and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*. Octubre de 2009;29(10):2625-43.
- [76] Merrington A. Recycling of Plastics. En: *Applied Plastics Engineering Handbook* [Internet]. 2.ª ed. Elsevier; 2017. p. 167-89. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323390408000092>
- [77] Ncube LK, Ude AU, Ogunmuyiwa EN, Zulkifli R, Beas IN. An Overview of Plastic Waste Generation and Management in Food Packaging Industries. *Recycling*. 12 de febrero de 2021;6(1):12.



- [78] Schyns ZOG, Shaver MP. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*. Febrero de 2021;42(3):2000415.
- [79] Roosen M, Mys N, Kusenbergh M, Billen P, Dumoulin A, Dewulf J, et al. Detailed Analysis of the Composition of Selected Plastic Packaging Waste Products and Its Implications for Mechanical and Thermochemical Recycling. *Environmental Science & Technology*. 20 de octubre de 2020;54(20):13282-93.
- [80] Ragaert K, Delva L, Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*. Noviembre de 2017;69:24-58.
- [81] Payne J, Jones MD. The Chemical Recycling of Polyesters for a Circular Plastics Economy: Challenges and Emerging Opportunities. *ChemSusChem*. 5 de octubre de 2021;14(19):4041-70.
- [82] Monteverde M. Análisis del reciclaje y la circularidad de envases en América Latina. *Latitud R*; 2020 p. 37.
- [83] Association of Plastic Manufacturers. *Plastics – the Facts 2020*. An analysis of European plastics production, demand and waste data [Internet]. *Plastics Europe*; 2020 p. 64. Disponible en: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>
- [84] Jiang J, Shi K, Zhang X, Yu K, Zhang H, He J, et al. From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Febrero de 2022;10(1):106867.
- [85] Huang J, Veksha A, Chan WP, Giannis A, Lisak G. Chemical recycling of plastic waste for sustainable material management: A prospective review on catalysts and processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Febrero de 2022;154:111866.
- [86] Ghosal K, Nayak C. Recent advances in chemical recycling of polyethylene terephthalate waste into value added products for sustainable coating solutions-hope vs. hype. *Materials Advances*. 2022;3(4):1974-92.
- [87] Solis M, Silveira S. Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. *Waste Management*. Marzo de 2020;105:128-38.
- [88] United Nations Environment Programme, “Turning off the Tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy. Nueva York. 2023.
- [89] Kosloski-Oh SC, Wood ZA, Manjarrez Y, De Los Rios JP, Fieser ME. Catalytic methods for chemical recycling or upcycling of commercial polymers. *Materials Horizons*. 2021;8(4):1084-129.
- [90] Zichittella G, Ebrahim AM, Zhu J, Brenner AE, Drake G, Beckham GT, et al. Hydrogenolysis of Polyethylene and Polypropylene into Propane over Cobalt-Based Catalysts. *JACS Au*. 24 de octubre de 2022;2(10):2259-68.
- [91] Peczak IL, Kennedy RM, Hackler RA, Wang R, Shin Y, Delferro M, et al. Scalable Synthesis of Pt/SrTiO₃ Hydrogenolysis Catalysts in Pursuit of Manufacturing-Relevant Waste Plastic Solutions. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 15 de diciembre de 2021;13(49):58691-700.



- [92] Huang Z. Chemical Recycling of Polystyrene to Valuable Chemicals via Selective Acid-Catalyzed Aerobic Oxidation under Visible Light. *Journal of the American Chemical Society*. Abril de 2022;144(14):6532-42.
- [93] Elmanovich IV, Stakhanov AI, Zefirov VV, Pavlov AA, Lokshin BV, Gallyamov MO. Thermal oxidation of polypropylene catalyzed by manganese oxide aerogel in oxygen-enriched supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*. Abril de 2020;158:104744.
- [94] Soni VK, Singh G, Vijayan BK, Chopra A, Kapur GS, Ramakumar SSV. Thermochemical Recycling of Waste Plastics by Pyrolysis: A Review. *Energy & Fuels*. 19 de agosto de 2021;35(16):12763-808.
- [95] Dogu O, Pelucchi M, Van De Vijver R, Van Steenberge PHM, D'hooge DR, Cuoci A, et al. The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges, and future directions. *Progress in Energy and Combustion Science*. Mayo de 2021;84:100901.
- [96] Miandad R, Rehan M, Barakat MA, Aburizaiza AS, Khan H, Ismail IMI, et al. Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: Moving Toward Pyrolysis Based Biorefineries. *Frontiers in Energy Research*. 19 de marzo de 2019;7:27.
- [97] Qureshi MS, Oasmaa A, Pihkola H, Deviatkin I, Tenhunen A, Mannila J, et al. Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Noviembre de 2020;152:104804.
- [98] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos [Internet]. Gobierno de México; 2020. Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/diagnostico-basico-para-la-gestion-integral-de-los-residuos-2020>
- [99] Beghetto V, Sole R, Buranello C, Al-Abkal M, Facchin M. Recent Advancements in Plastic Packaging Recycling: A Mini-Review. *Materials*. 24 de agosto de 2021;14(17):4782.
- [100] Kumar S, Singh RK. Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Diciembre de 2011;28(4):659-67.
- [101] Ahmad I, Khan MI, Khan H, Ishaq M, Tariq R, Gul K, et al. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene into Premium Oil Products. *International Journal of Green Energy*. 3 de julio de 2015;12(7):663-71.
- [102] Onwudili JA, Insura N, Williams PT. Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Noviembre de 2009;86(2):293-303.
- [103] Banu JR, Sharmila VG, Ushani U, Amudha V, Kumar G. Impervious and influence in the liquid fuel production from municipal plastic waste through thermo-chemical biomass conversion technologies - A review. *Science of The Total Environment*. Mayo de 2020;718:137287.
- [104] Longwell JP. Texaco Gasification Process. En: Holm FW, editor. *Mobile Alternative Demilitarization Technologies* [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; 1997. p. 183-94. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-5526-7_11



- [105] Ragaert K, Delva L, Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*. Noviembre de 2017;69:24-58.
- [106] Erkiaga A, Lopez G, Amutio M, Bilbao J, Olazar M. Syngas from steam gasification of polyethylene in a conical spouted bed reactor. *Fuel*. Julio de 2013;109:461-9.
- [107] Xiao R, Jin B, Zhou H, Zhong Z, Zhang M. Air gasification of polypropylene plastic waste in fluidized bed gasifier. *Energy Conversion and Management*. Marzo de 2007;48(3):778-86.
- [108] Munir D, Irfan MF, Usman MR. Hydrocracking of virgin and waste plastics: A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Julio de 2018;90:490-515.
- [109] Liu S, Kots PA, Vance BC, Danielson A, Vlachos DG. Plastic waste to fuels by hydrocracking at mild conditions. *Science Advances*. 23 de abril de 2021;7(17):8283-304.
- [110] Makarichi L, Jutidamrongphan W, Techato K anan. The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Agosto de 2018;91:812-21.
- [111] Verma R, Vinoda KS, Papireddy M, Gowda ANS. Toxic Pollutants from Plastic Waste- A Review. *Procedia Environmental Sciences*. 2016;35:701-8.
- [112] Jin J, Arciszewski J, Auclair K, Jia Z. Enzymatic polyethylene biorecycling: Confronting challenges and shaping the future. *Journal of Hazardous Materials*. Octubre de 2023;460:132449.
- [113] Chia WY, Ying Tang DY, Khoo KS, Kay Lup AN, Chew KW. Nature's fight against plastic pollution: Algae for plastic biodegradation and bioplastics production. *Environmental Science and Ecotechnology*. Octubre de 2020;4:100065.
- [114] Zhang Y, Lin Y, Gou H, Feng X, Zhang X, Yang L. Screening of Polyethylene-Degrading Bacteria from *Rhizopertha Dominica* and Evaluation of Its Key Enzymes Degrading Polyethylene. *Polymers*. 25 de noviembre de 2022;14(23):5127.
- [115] Ghatge S, Yang Y, Ahn JH, Hur HG. Biodegradation of polyethylene: a brief review. *Applied Biological Chemistry*. Diciembre de 2020;63(1):27.
- [116] Temporiti MEE, Nicola L, Nielsen E, Tosi S. Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. *Microorganisms*. 8 de junio de 2022;10(6):1180.
- [117] Zeghal E, Vaksmaa A, Vielfaure H, Boekhout T, Niemann H. The Potential Role of Marine Fungi in Plastic Degradation – A Review. *Frontiers in Marine Science*. 29 de noviembre de 2021;8:738877.
- [118] Cacciari I, Quatrini P, Zirletta G, Mincione E, Vinciguerra V, Lupattelli P, et al. Isotactic polypropylene biodegradation by a microbial community: physicochemical characterization of metabolites produced. *Applied and Environmental Microbiology*. Noviembre de 1993;59(11):3695-700.
- [119] Arkatkar A, Arutchelvi J, Bhaduri S, Uppara PV, Doble M. Degradation of unpretreated and thermally pretreated polypropylene by soil consortia. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Enero de 2009;63(1):106-11.



[120] Jiang R, Shang L, Wang R, Wang D, Wei N. Machine Learning Based Prediction of Enzymatic Degradation of Plastics Using Encoded Protein Sequence and Effective Feature Representation. *Environmental Science & Technology Letters*. 11 de julio de 2023;10(7):557-64.

[121] OECD. Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management [Internet]. Paris: OECD; 2016. Disponible en: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/extended-producer-responsibility_9789264256385-en

[122] Phillips C. Revealing Materials: plastics in alternative food economies. *Australian Geographer*. 3 de abril de 2017;48(2):169-84.

[123] Potting J, Hekkert M, Worrell E, Hanemaaijer A. Circular economy: measuring innovation in the product chain. Policy report. 2017.

[124] European Commission. A European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent [Internet]. European Commission; 2023. Disponible en: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[125] Plastic Action Centre. Economic study of the Canadian plastic industry, markets and waste: summary report to Environment and Climate Change Canada. 2018.

[126] Monteverde M. Análisis del reciclaje y la circularidad de envases en América Latina. *Latitud R*; 2020 p. 37.

[127] Melchor-Martínez EM, Macías-Garbett R, Alvarado-Ramírez L, Araújo RG, Sosa-Hernández JE, Ramírez-Gamboa D, et al. Towards a Circular Economy of Plastics: An Evaluation of the Systematic Transition to a New Generation of Bioplastics. *Polymers*. 17 de marzo de 2022;14(6):1203.

[128] Cruz RMS, Krauter V, Krauter S, Agriopoulou S, Weinrich R, Herbes C, et al. Bioplastics for Food Packaging: Environmental Impact, Trends and Regulatory Aspects. *Foods*. 5 de octubre de 2022;11(19):3087.

[129] Plastics Industry Association. Bioplastics simplified: attributes of biobased and biodegradable plastics [Internet]. 2020. Disponible en: <https://plasticsindustry.org/wp-content/uploads/2022/11/2020-Bioplastics-Simplified.pdf>

[130] E. Bioplastics, "FACT SHEET." [Online]. Available: <http://www.european-bioplastics.org/news/publications/>

[131] Plastics Industry Association. Bioplastics simplified: attributes of biobased and biodegradable plastics [Internet]. 2020. Disponible en: <https://plasticsindustry.org/wp-content/uploads/2022/11/2020-Bioplastics-Simplified.pdf>

[132] Visco A, Sclaro C, Facchin M, Brahimi S, Belhamdi H, Gatto V, et al. Agri-Food Wastes for Bioplastics: European Prospective on Possible Applications in Their Second Life for a Circular Economy. *Polymers*. 5 de julio de 2022;14(13):2752.



[133] E. Bioplastics, "FACT SHEET." [Online]. Available: <http://www.european-bioplastics.org/news/publications/>

[134] Hahladakis JN, Lacovidou E. Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity? *Science of The Total Environment*. Julio de 2018;630:1394-400.

[135] "Press Release APK Relies on Coperion ZSK Extruder Technology for Newcycling @ How to Make High-Quality Plastic Compounds Out of Packaging Waste." [Online]. Available: www.konsens.de

[136] Unilever, "Our goal to reduce plastic packaging | Unilever." Accessed: Sep. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.unilever.com/planet-and-society/waste-free-world/rethinking-plastic-packaging/>

[137] Packaging Europe. Reuse: a closer look at Coca-Cola Brazil's unique returnable bottle initiative. *Packaging Europe* [Internet]. 11 de febrero de 2020;18. Disponible en: <https://packagingeurope.com/reuse-a-closer-look-at-coca-cola-brazils-unique-returnable-bottle-initiative/1583.article>

[138] ENKA. Informe de sostenibilidad. Girardota: ENKA; 2020.



