

# Technological and Methodological Advances in Plastic Recycling: A Systematic Literature Review

Dayanna Aracelly Delgado Cartagena, Bach.<sup>1</sup>; Italo Treviño-Zevallos, Dr.<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup> Universidad Tecnológica del Perú (UTP), Av. Tacna y Arica 160, Arequipa, Perú  
U18303152@utp.edu, itrevino@utp.edu.pe

**Abstract**– *The evolution of technologies and efficient methods in plastic recycling has transformed waste management, offering new opportunities to mitigate environmental pollution and promote the circular economy. This study analyzes 50 research papers that explore the latest advancements in this field. It highlights that methods such as mechanical, chemical, enzymatic, and advanced thermal recycling have a significant impact on sustainability and efficiency. Findings indicate that mechanical recycling, although widely used due to its low cost, has limitations regarding the quality of the recovered material. In contrast, chemical and advanced thermal recycling enable greater resource recovery by breaking down polymers into monomers or basic products, although they require higher energy investments. Innovations such as enzymatic recycling show great potential for processing complex plastics, opening new perspectives in the field. The results also emphasize the need to optimize processes and develop infrastructure to overcome challenges such as material purity and operational costs, ensuring a higher recovery rate. Additionally, the study underscores the importance of integrating these technologies with public policies and circular economy models to maximize their positive impact on the environment and reduce plastic pollution.*

**Keywords**– *Mechanical recycling, chemical recycling, thermal decomposition, enzymatic recycling, sustainability, circular economy*

# Avances tecnológicos y metodológicos en el reciclaje del plástico, una revisión sistemática de literatura

Dayanna Aracelly Delgado Cartagena, Bach.<sup>1</sup>; Italo Treviño-Zevallos, Dr.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Universidad Tecnológica del Perú (UTP), Av. Tacna y Arica 160, Arequipa, Perú  
U18303152@utp.edu, itrevino@utp.edu.pe

**Resumen—** La evolución de las tecnologías y métodos eficientes en el reciclaje del plástico ha transformado la gestión de residuos, ofreciendo nuevas oportunidades para mitigar la contaminación ambiental y fomentar la economía circular. En este trabajo se analizan 50 estudios que abordan los avances más recientes en este ámbito. Se destaca que los métodos como el reciclaje mecánico, químico, enzimático y térmico avanzado tienen un gran impacto en la sostenibilidad y eficiencia. Se encontró que el reciclaje mecánico, aunque ampliamente utilizado por su bajo costo, tiene limitaciones en la calidad del material recuperado. Por su parte, el reciclaje químico y térmico avanzados permiten una mayor recuperación de recursos al descomponer polímeros en monómeros o productos básicos, aunque requieren mayores inversiones energéticas. Innovaciones como el reciclaje enzimático muestran un gran potencial para procesar plásticos complejos, abriendo nuevas perspectivas en el campo. Los resultados también denotan la necesidad de optimizar procesos y desarrollar infraestructuras para superar desafíos como la pureza del material y los costos operativos, asegurando una mayor tasa de recuperación. Además, se subraya la importancia de integrar estas tecnologías con políticas públicas y modelos de economía circular para maximizar su efecto positivo en la naturaleza y reducir la contaminación plástica.

**Palabras clave—** Reciclaje mecánico, reciclaje químico, descomposición térmica, reciclaje enzimático, sostenibilidad, economía circular.

## I. INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas han provocado un notable incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ha intensificado el calentamiento global [1]. Dentro de estas actividades, la producción y el desecho de plásticos representan una fuente significativa de emisiones contaminantes, especialmente aquellos plásticos de un solo uso, como bolsas y envases [2], [3], [4]. En este contexto, el reciclaje de plásticos se ha convertido en una estrategia clave para mitigar los impactos ambientales del plástico. Este proceso permite transformar materiales usados, que de otro modo serían desechados, en recursos reutilizables. También implica la recuperación y reutilización de residuos generados por diversas actividades humanas [2]. De esta manera, el reciclaje no solo reduce la cantidad de desechos acumulados en el medio ambiente, sino que también convierte los residuos en materia prima limpia y útil para la producción de nuevos productos [5].

Desde la década de 1950, los plásticos han revolucionado la vida cotidiana debido a su versatilidad y amplitud de aplicaciones [4]. Actualmente, están presentes en casi todos los sectores, desde la industria alimentaria y los envases hasta la construcción, la manufactura textil y la producción de componentes para automóviles [6]. Entre los plásticos más

utilizados a nivel global se encuentran el polietileno de alta y baja densidad (HDPE y LDPE), el poliestireno (PS), el cloruro de polivinilo (PVC), el polipropileno (PP) y el tereftalato de polietileno (PET), los cuales representan aproximadamente el 90 % de la producción mundial de plásticos [7]. Su popularidad se debe a características como su bajo costo, ligereza, resistencia, baja conductividad térmica y, en algunos casos la transparencia [8]. Sin embargo, su uso masivo ha generado un grave problema ambiental, ya que la producción mundial de plástico ha alcanzado los 400 millones de toneladas anuales [9].

Las proyecciones indican que, para el año 2050, la cantidad de plásticos en los océanos superará la biomasa de los peces [10]. Esto se debe a la acumulación constante de residuos plásticos en el medio ambiente, lo que representa una seria amenaza para los ecosistemas y la salud humana [11]. La mayoría de los plásticos comerciales se fabrican a partir de monómeros derivados de hidrocarburos fósiles, como el propileno y el etileno, y no son biodegradables [12]. Debido a su resistencia a la descomposición, estos materiales persisten en el entorno durante décadas, contaminando los océanos, el suelo y el aire [9]. Su acumulación descontrolada se ha convertido en una preocupación ambiental prioritaria, ya que afectan la biodiversidad, los ecosistemas y la salud humana [12].

Para enfrentar este problema, la investigación y el desarrollo han impulsado la creación de materiales biodegradables y tecnologías de reciclaje avanzadas. Estas soluciones buscan recuperar recursos o energía a partir de plásticos biodegradables desechados [6], [13]. En este sentido, es fundamental fortalecer las estrategias de gestión de residuos plásticos mediante la incorporación de tecnologías innovadoras y métodos avanzados de reciclaje que permitan optimizar el aprovechamiento de estos materiales y reducir su impacto ambiental [14].

En este trabajo se revisan los avances más recientes en las tecnologías y metodologías más eficientes para el reciclaje de plásticos, evaluando su impacto en términos de sostenibilidad y eficiencia en la gestión de residuos. A través de un análisis detallado, se busca proporcionar una visión integral sobre el reciclaje de plásticos, destacando los desarrollos tecnológicos más prometedores y sus aplicaciones dentro de un modelo de economía circular.

## II. METODOLOGÍA

En la presente Revisión Sistemática de Literatura (RSL) se aplicó la estrategia PICO para formular la siguiente pregunta

de investigación: ¿Cómo los avances tecnológicos impactan en la eficiencia del reciclaje de plásticos?. Para abordar esta cuestión, se definieron las siguientes preguntas complementarias:

- ¿Cómo está definido el reciclaje del plástico?
- ¿Cuáles son los avances tecnológicos más recientes en el reciclaje de plásticos?
- ¿Cómo se comparan los métodos tradicionales y los avances tecnológicos en términos de reducción de residuos plásticos?
- ¿Qué impacto tienen los avances tecnológicos en la sostenibilidad del reciclaje de plásticos?

Estas preguntas fueron fundamentales para el desarrollo de una ecuación de búsqueda que integrara términos clave relacionados con el reciclaje de plásticos, las tecnologías aplicadas y la reducción de la contaminación ambiental. Para mejorar la precisión y relevancia de los resultados, se emplearon los operadores lógicos "OR" y "AND", obteniendo la siguiente ecuación de búsqueda: "Recyclability" OR "Post-consumer plastic" OR "Waste management" OR "Polymer degradation" OR "Plastic contamination" OR "Plastic recycling" OR "Microplastics pollution" OR "Plastic recovery rates" OR "Plastic recycling infrastructure" AND "Mechanical recycling" OR "Chemical recycling" OR "Pyrolysis" OR "Circular economy" OR "Recycling innovations" OR "Traditional recycling methods" OR "Technological advancements" OR "Comparison" OR "Mechanical vs chemical recycling" OR "Advanced thermal decomposition" OR "Enzyme based plastic recycling" OR "Pyrolysis" AND "Carbon footprint" OR "Energy consumption" OR "Resource conservation" OR "Renewable materials" OR "Efficiency" OR "Plastic waste reduction" OR "Sustainability" OR "Environmental impact" OR "Sustainable material management" OR "Long-term environmental benefits" OR "Waste minimization" OR "Emission reduction". Para la recopilación de información, se escogió como base de datos académica a Scopus. La ecuación mencionada anteriormente se ingresó en ella, obteniendo inicialmente 7190 documentos.

El proceso de búsqueda también se realizó con el propósito de llevar a cabo la RSL, añadiendo criterios de inclusión y exclusión:

### *Criterios de inclusión*

- CI1: El artículo debe incluir palabras clave como "reciclaje de plásticos, tecnología ambiental, reciclaje mecánico, reciclaje químico, reciclaje mecánico, sostenibilidad".
- CI2: El título del artículo guarda relación con el tema de la RSL.
- CI3: Los artículos deben estar relacionados al área de ingeniería
- CI4: El artículo debe estar en etapa final

- CI5: Solo se considerarán artículos que se puedan visualizar con texto completo y acceso gratuito.

### *Criterios de exclusión*

- CE1: Se excluirán artículos que no incluyan las palabras clave como "reciclaje de plásticos, tecnología ambiental, reciclaje químico, reciclaje mecánico, sostenibilidad".
- CE2: El artículo está en un idioma diferente al inglés o español.
- CE3: El título del artículo no guarda relación con la RSL a investigar.
- CE4: Los artículos no están relacionados al área de ingeniería
- CE5: El artículo no ofrece acceso al texto completo.
- CE6: El artículo no está en etapa final

Siguiendo la metodología PRISMA [15] se realizó un proceso de selección dentro de los 7,190 artículos encontrados. En una primera etapa, se eliminaron los artículos duplicados y aquellos que fueron etiquetados automáticamente como no legibles, lo que resultó en la exclusión de 4 artículos debido a la imposibilidad de acceder a su contenido en formato pdf.

Posteriormente, se aplicaron diversas restricciones para afinar la búsqueda. Se filtraron los documentos según el tipo de publicación, considerando únicamente artículos y revisiones, y se estableció un marco temporal entre 2019 y 2024, lo que llevó a la eliminación de 3,170 artículos, reduciendo el conjunto a 4,016 documentos. En la fase de selección, se excluyeron aquellos artículos que no contaban con acceso abierto o que estaban escritos en idiomas distintos al inglés o español, lo que redujo el número de documentos a 2,156. Posteriormente, se descartaron 1,695 artículos adicionales debido a su falta de relación con el área de ingeniería, quedando un total de 465 artículos.

A continuación, se realizó una evaluación más detallada de estos trabajos, eliminando 4 artículos que no se encontraban en su etapa final, lo que dejó 461 artículos en la revisión. Adicionalmente, 258 artículos fueron excluidos por no contener las palabras clave esenciales para la investigación, resultando en 199 documentos seleccionados.

Finalmente, se descartaron 149 artículos adicionales debido a que su título no guardaba relación con la pregunta de investigación de la RSL, obteniendo un total de 50 artículos elegidos para el análisis final. Este proceso de selección y refinamiento de documentos fue representado en un diagrama de flujo PRISMA (Fig. 1), ilustrando cada etapa de depuración aplicada en la revisión sistemática.

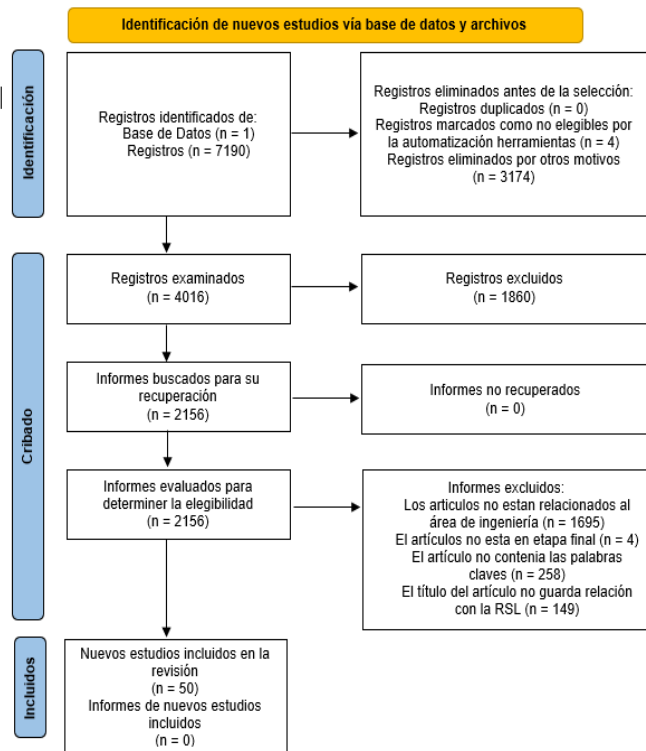


Fig. 1 Diagrama de Flujo Prisma

### III. RESULTADOS

La mayoría de los artículos analizados resaltan la importancia del reciclaje de plásticos como una estrategia clave para reducir el impacto ambiental [28]. Este proceso permite disminuir significativamente la cantidad de desechos que terminan en vertederos y océanos, lo que ayuda a proteger los ecosistemas y la vida silvestre [22], [36], [45]. Además, el reciclaje de plásticos contribuye a la economía circular, ya que facilita la reutilización de materiales para la fabricación de nuevos productos y reduce la dependencia de la producción de plásticos a partir de combustibles fósiles [18], [35], [56]. De esta manera, no solo se minimiza la acumulación de residuos, sino que también se fomenta una gestión más sostenible de los materiales plásticos, generando recursos útiles que pueden reintegrarse al ciclo productivo.

Numerosos estudios académicos realizados en distintas partes del mundo refuerzan esta perspectiva. Países como España, China y Estados Unidos lideran las investigaciones sobre reciclaje de plásticos, evidenciando la relevancia global del tema y su capacidad de adaptación a diferentes contextos. Esto refleja un compromiso creciente con la implementación de prácticas sostenibles que pueden aplicarse a nivel internacional para mitigar el impacto ambiental de los residuos plásticos y fortalecer el modelo de economía circular.

El análisis geográfico de los estudios recopilados evidencia una distribución desigual en la investigación sobre el reciclaje de plásticos (Fig. 2). Europa se posiciona como la región con mayor número de publicaciones, representando más del 40% del total de estudios. España destaca como un país líder en este campo debido a su enfoque activo en la búsqueda de tecnologías innovadoras para el reciclaje de plásticos. Asia, con un 26% de los estudios, ocupa el segundo lugar, impulsado por el desarrollo e implementación de nuevas estrategias de reciclaje en países como China, Corea del Sur e Indonesia. América del Norte representa aproximadamente un 20% de las investigaciones, con Estados Unidos como el único país destacado en la región, lo que plantea interrogantes sobre la posible concentración de tecnologías en este territorio. Finalmente, en Sudamérica, Chile se posiciona con un 4% de las investigaciones, evidenciando la creciente importancia del reciclaje de plásticos en esta región.



Fig. 2: Número de estudios sobre reciclaje de plástico a nivel mundial.

Los tipos de plásticos utilizados en el reciclaje son clave para determinar la variedad y cantidad de productos que pueden generarse (Tabla I).

Para el reciclaje del plástico se emplean diferentes tecnologías o métodos según el tipo de plástico a reciclar. Entre ellos se destacan el polietileno, polipropileno y polietileno tereftalato [18], [39], [50]. Plásticos como el PET y el HDPE, ampliamente reciclados, producen combustibles y otros materiales valiosos al descomponerse, ya que sus propiedades químicas permiten la generación de compuestos útiles en mayores volúmenes [16], [29], [36], [46]. En cambio, plásticos como el PVC y el PS presentan más limitaciones debido a su composición, lo que reduce su aprovechamiento en ciertos procesos [53]. La elección y clasificación adecuada de los tipos de plásticos, entonces, es esencial para optimizar los productos reciclados y maximizar su valor en el ciclo de reciclaje [19], [27],[30].

El reciclaje de plásticos involucra diversas tecnologías y métodos que varían según el tipo de material a procesar. La eficiencia de estos métodos depende en gran medida de la composición química y las propiedades físicas de cada tipo de plástico. Entre los plásticos más comúnmente reciclados se encuentran el polietileno (PE), el polipropileno (PP) y el polietileno tereftalato (PET), debido a su alta demanda y facilidad de procesamiento [18], [39], [50]. Estos plásticos, particularmente el PET y el polietileno de alta densidad (HDPE), son ampliamente reciclados, ya que su descomposición permite la obtención de combustibles, fibras sintéticas y otros materiales valiosos. Sus propiedades químicas favorecen la generación de compuestos reutilizables en mayores volúmenes, lo que los convierte en materiales esenciales dentro de la economía circular [16], [29], [36], [46]. Por otro lado, plásticos como el cloruro de polivinilo (PVC) y el poliestireno (PS) presentan mayores limitaciones para el reciclaje. Su composición química y la presencia de aditivos dificultan su procesamiento, reduciendo su aprovechamiento en ciertos métodos de reciclaje. En muchos casos, estos plásticos requieren tratamientos especializados o tecnologías avanzadas para minimizar su impacto ambiental y maximizar su reutilización [53]. La dificultad de reciclaje de estos materiales ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y biodegradables, así como mejoras en los procesos existentes para hacerlos más eficientes y rentables. La correcta clasificación y selección de los plásticos a reciclar es un paso fundamental para optimizar la calidad y utilidad de los productos reciclados. Una adecuada separación de los materiales facilita su procesamiento y reduce la contaminación en las cadenas de reciclaje, lo que permite maximizar el valor del plástico recuperado y mejorar su incorporación en nuevos ciclos productivos [19], [27], [30]. De esta manera, el desarrollo de estrategias más efectivas para la identificación y tratamiento de distintos tipos de plásticos resulta esencial para fortalecer los sistemas de reciclaje y reducir el impacto ambiental asociado a estos materiales.

TABLA I  
TIPOS DE PLÁSTICOS PROCESADOS EN EL RECICLAJE

| Tipos de Plásticos      | Abreviatura | Referencias                                                                        |
|-------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Polietileno             | PE          | [19], [33], [50], [53], [55]                                                       |
| Polipropileno           | PP          | [16], [19], [24], [31], [33], [36], [37], [39], [40], [43], [44], [45], [46], [50] |
| Polietileno Tereftalato | PET         | [16], [18], [19], [28], [30], [31], [36], [37], [39], [43], [44], [45], [57], [61] |
| Ácido Poliláctico       | PLA         | [17], [38], [52], [54], [57], [62]                                                 |
| Termoplásticos          | -           | [21], [22]                                                                         |
| Polihidroxialcanoato    | PHA         | [23]                                                                               |
| Polifenileno Sulfuro    | PPS         | [25]                                                                               |
| Poliestireno            | PS          | [27], [33], [37], [45], [46], [53]                                                 |
| Almidón Termoplástico   | TPS         | [28]                                                                               |

|                                        |      |                                                |
|----------------------------------------|------|------------------------------------------------|
| Polietileno de alta densidad           | HDPE | [29], [31], [33], [44], [45], [46], [50]       |
| Polietileno de baja densidad           | LDPE | [31], [34], [37], [43], [44], [45], [46], [48] |
| Polycarbonato                          | PC   | [30]                                           |
| Poliuretano                            | PU   | [30]                                           |
| Poliamida                              | PA   | [30]                                           |
| Tereftalato de adipato de polibutileno | PBAT | [38], [57]                                     |
| Poliéster                              | PL   | [40], [50]                                     |
| Cloruro de polivinilo                  | PVC  | [53]                                           |

Comprender qué sectores económicos generan los mayores volúmenes de plásticos reciclables es fundamental para optimizar los procesos de reciclaje y promover prácticas más sostenibles. La identificación de estos sectores permite reconocer las áreas con mayor potencial de contribución, así como aquellas que aún presentan oportunidades de mejora en términos de sostenibilidad. Analizar la distribución de residuos plásticos según su origen facilita el desarrollo de estrategias más efectivas para incrementar la tasa de recuperación y reutilización de estos materiales (Figura 2) [23], [34], [52].

La información obtenida indica que el reciclaje de plásticos depende en gran medida de ciertos sectores económicos, que generan un alto volumen de residuos y, por lo tanto, tienen un mayor impacto en la gestión de plásticos reciclables. Como se observa en la Fig. 3, el sector del comercio destaca como el principal generador de residuos plásticos, representando la mayor cantidad de artículos analizados. Esto sugiere que se debe enfocar la implementación de tecnologías de reciclaje y políticas de reducción de desechos en este sector para maximizar su impacto. En segundo lugar, se encuentran sectores como las aplicaciones agrícolas y los residuos post-industriales, los cuales también generan un volumen considerable de plásticos reciclables. Estos sectores pueden beneficiarse de la adopción de tecnologías innovadoras para mejorar la eficiencia del reciclaje y reducir la acumulación de desechos plásticos.

Por otro lado, sectores como la industria alimentaria y los residuos municipales presentan una contribución significativa, lo que indica la necesidad de fortalecer las infraestructuras de reciclaje en estas áreas. Sin embargo, otros sectores como el manufacturero, biomédico, textil, automotriz, restaurantes y construcción presentan una menor representación en los estudios sobre reciclaje de plásticos, lo que puede deberse a una menor generación de residuos o a la falta de estudios específicos en estos ámbitos.

El hecho de que algunos sectores tengan una menor representación en la investigación sugiere que existe un potencial sin explotar en la aplicación de estrategias de reciclaje en diversas industrias. Sectores con menor aporte pueden explorar el uso de materiales más sostenibles, la reducción del uso de plásticos y el desarrollo de prácticas más eficientes para contribuir al reciclaje [18], [20].

En este sentido, la integración de políticas sostenibles y el desarrollo de infraestructuras adecuadas para la gestión de plásticos en todos los sectores resultan esenciales para mejorar la eficiencia del reciclaje. Un enfoque estructurado y dirigido hacia las industrias de mayor impacto permitiría maximizar la recuperación de plásticos y reducir significativamente la contaminación ambiental.

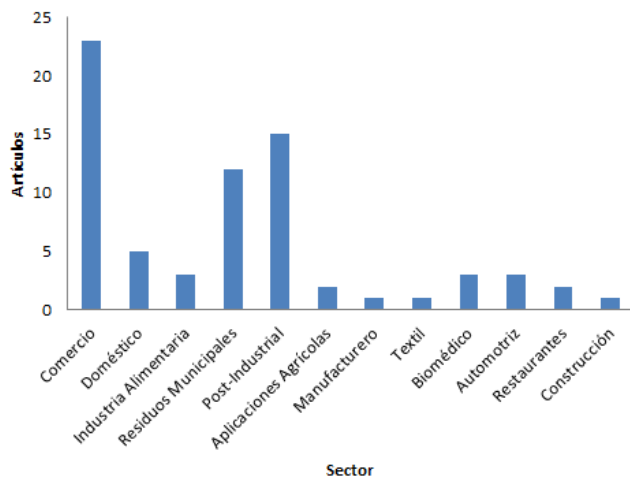


Fig. 3: Sector de procedencia del plástico.

Considerando el origen y tipo de plástico a reciclar, se implementan diversas metodologías (Tabla II) que permiten reutilizar y transformar los plásticos en nuevos productos, optimizando recursos y reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes [19], [25], [36]. Estas metodologías incluyen desde técnicas tradicionales, como el reciclaje mecánico, hasta innovaciones tecnológicas avanzadas, como el reciclaje químico, la despolimerización y el uso de blockchain para garantizar la trazabilidad del proceso y mejorar la eficiencia [29], [38], [56].

Cada método posee características y aplicaciones específicas, lo que permite abordar el reciclaje de plásticos desde múltiples enfoques [27]. Mientras que las metodologías tradicionales, como el reciclaje mecánico, son ampliamente utilizadas para plásticos comunes, técnicas más avanzadas, como el reciclaje químico y la despolimerización, ofrecen soluciones para plásticos de difícil reciclaje [29], [48], [52]. Adicionalmente, herramientas como el análisis de ciclo de vida permiten evaluar el impacto ambiental de cada proceso, mientras que la implementación de blockchain contribuye a la transparencia y optimización en la gestión de residuos plásticos [28].

La combinación de estas metodologías representa un enfoque integral para enfrentar los desafíos del reciclaje y avanzar hacia una economía circular más sostenible. Comprender estos métodos y sus aplicaciones es clave para mejorar la eficiencia en la gestión de plásticos y desarrollar estrategias más efectivas en la reducción de residuos [42], [59], [63].

TABLA II  
METODOLOGÍAS PARA EL RECICLAJE DEL PLÁSTICO

| Metodologías              | Descripción                                                                                                                                                                                | Referencias                                                                  |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Reciclaje Mecánico        | Proceso físico que consiste en la recolección, trituración y fundición del plástico para formar nuevos productos sin modificar su estructura química.                                      | [16], [21], [31], [56], [60], [62]                                           |
| Reciclaje Biológico       | Uso de microorganismos o enzimas para descomponer plásticos biodegradables.                                                                                                                | [31], [38]                                                                   |
| Reciclaje Químico         | Proceso en el que se rompen las moléculas de plástico a nivel químico, obteniendo monómeros o compuestos base que pueden reutilizarse para producir nuevos plásticos o productos químicos. | [16], [21], [31], [56], [60]                                                 |
| Análisis de Ciclo de Vida | Herramienta que evalúa el impacto ambiental de un producto plástico desde su fabricación hasta su disposición final. Ayuda a identificar mejoras sostenibles en el reciclaje.              | [17], [22], [23], [24], [33], [34], [40], [43], [44], [48], [55], [58], [63] |
| Upcycling                 | Transformación de residuos plásticos en productos de mayor valor o utilidad. A diferencia del reciclaje convencional, se busca mejorar el valor del producto final.                        | [20]                                                                         |
| Hidroconfiguración        | Técnica emergente que utiliza agua para moldear y reciclar plásticos, facilitando la creación de nuevos productos a partir de residuos plásticos de manera eficiente.                      | [26]                                                                         |
| Compostaje Casero         | Proceso de descomposición de plásticos biodegradables en un entorno doméstico, generando abono orgánico sin requerir instalaciones industriales.                                           | [28], [38]                                                                   |
| Pirólisis                 | Proceso de descomposición de plásticos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, generando productos como combustibles líquidos y gaseosos.                                             | [29], [45], [46], [53]                                                       |
| Glicólisis Catalítica     | Tipo de reciclaje químico que utiliza catalizadores y glicoles para descomponer ciertos tipos de plásticos, como el PET, en sus monómeros originales.                                      | [30]                                                                         |
| Organocatalizadores       | Uso de catalizadores orgánicos en el reciclaje de plásticos, que permite realizar reacciones químicas de manera más sostenible y reducir el uso de metales pesados.                        | [30]                                                                         |
| Blockchain                | Tecnología que proporciona trazabilidad en el reciclaje de plásticos, asegurando transparencia en la cadena de reciclaje y verificando el origen y tratamiento de los residuos plásticos.  | [32], [35]                                                                   |
| Despolimerización         | Proceso químico mediante el cual los plásticos se descomponen en sus monómeros originales, permitiendo la creación de nuevos plásticos sin perder calidad.                                 | [54]                                                                         |

En el reciclaje de plásticos, los avances tecnológicos (Tabla III) han permitido abordar de manera más eficiente y sostenible la recuperación y reutilización de materiales plásticos [29]. Estas innovaciones han facilitado la descomposición de plásticos complejos, aumentando la calidad de los materiales reciclados y permitiendo su reincorporación en nuevos ciclos de producción sin pérdida

significativa de propiedades [52,] [61]. Además, la implementación de métodos avanzados para la trazabilidad y el análisis del impacto ambiental en cada etapa del proceso ha mejorado la transparencia y eficiencia en la cadena de reciclaje [ 29,] [40].

TABLA III  
TECNOLOGÍAS PARA EL RECICLAJE DEL PLÁSTICO

| Tecnologías                     | Descripción                                                                                         | Referencias                                                                                    |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reciclaje Mecánico              | Transformar los plásticos en nuevos productos sin alterar su estructura química.                    | [16], [19], [20], [25], [31], [32], [35], [37], [28], [39], [49], [50], [54], [56], [60], [62] |
| Reciclaje Químico               | Descompone los plásticos en sus monómeros originales mediante reacciones químicas.                  | [16], [20], [31], [36], [39], [49], [50], [54], [60], [62]                                     |
| Descomposición Térmica Avanzada | Usa calor extremo y atmósferas controladas para romper la estructura molecular.                     | [16]                                                                                           |
| Geopolimerización               | Conversión de residuos plásticos en geopolímeros, materiales similares al cemento.                  | [18]                                                                                           |
| Pirólisis                       | Calienta los plásticos en ausencia de oxígeno.                                                      | [22], [29], [46], [53]                                                                         |
| Biorrefinería Fototrófica       | Emplea microorganismos fototróficos para descomponer residuos plásticos.                            | [23]                                                                                           |
| Pirólisis Térmica               | Descompone los plásticos en sus componentes básicos usando calor elevado.                           | [12], [19], [30]                                                                               |
| Glicólisis Catalítica           | Se usan catalizadores en glicólisis para descomponer plásticos como el PET.                         | [30]                                                                                           |
| Blockchain                      | Tecnología que proporciona trazabilidad en el reciclaje de plásticos.                               | [32], [20]                                                                                     |
| Incineración                    | La quema de plásticos para recuperar energía.                                                       | [29]                                                                                           |
| Pirólisis Catalítica            | Utiliza catalizadores para mejorar la eficiencia y selectividad de la descomposición de plásticos.  | [40]                                                                                           |
| Tecnología Deinking             | Proceso de 'desentintado' que limpia plásticos reciclables de tintas y contaminantes superficiales. | [33]                                                                                           |
| Co-Pirólisis                    | La pirólisis conjunta de plásticos con otros materiales.                                            | [49]                                                                                           |

Esto ha permitido ampliar las aplicaciones de los materiales reciclados, eliminar la dependencia de materias primas vírgenes y disminuir significativamente el volumen de residuos plásticos que terminan en vertederos o en medio de la naturaleza [29], [41], [56]. En conjunto, estos desarrollos representan un paso importante hacia una economía circular, donde los plásticos se reintegran continuamente en lugar de convertirse en desechos [ 28].

A su vez estas tecnologías tienen limitaciones en el uso del reciclaje incluyen los altos costos de inversión y la necesidad de infraestructura especializada, lo cual complica la adopción a gran escala [55]. La reducción en las propiedades técnicas del material reciclado, como la resistencia y durabilidad, limita su aplicabilidad en ciertos sectores

industriales [24], [60]. Además, el proceso suele implicar un consumo energético elevado y enfrenta dificultades técnicas para asegurar la pureza del material, ya que la presencia de contaminantes afecta la calidad del producto final [49], [51]. En el reciclaje mecánico [19], los bajos costos de inversión y operación se ven frenados por la necesidad de corrientes muy limpias: la contaminación cruzada reduce el valor del granulado y la degradación térmica de polímeros como PE y PP limita los ciclos de reprocesado. El reciclaje químico mediante pirólisis o glicólisis [29] exige reactores que operan a temperaturas elevadas y requiere inversiones de capital sustanciales; además, sin recuperación de calor la eficiencia energética global disminuye de forma significativa [33]. La pirólisis catalítica [26] mejora la selectividad de productos, pero el consumo y la desactivación del catalizador elevan los costos operativos. El reciclaje enzimático de PET [52] alcanza conversiones altas, aunque los precios de las enzimas y los largos tiempos de residencia siguen limitando su competitividad industrial. En conjunto, estas barreras subrayan la necesidad de incentivos y de responsabilidad extendida del productor para equilibrar los costos frente a los materiales vírgenes.

También se presentan desafíos como la falta de normativas claras, la complejidad en el manejo de contaminantes, y la dificultad para separar y limpiar adecuadamente los materiales [17], [23], [39], [47]. Esto se suma a la inestabilidad de algunos materiales reciclados en condiciones ambientales específicas y la necesidad de sistemas avanzados de información e infraestructura para el procesamiento eficiente [20]. En algunos casos, la dependencia de la conducta del consumidor y la falta de incentivos económicos dificultan la implementación efectiva de estas tecnologías en la práctica [14], [27], [28].

El proceso del reciclaje ofrece múltiples beneficios ambientales, como la reducción de residuos en vertederos, lo cual disminuye la contaminación del agua y suelo, eliminando así la acumulación de desechos en el medio ambiente [19], [52], [57]. Además, el reciclaje contribuye a preservar los recursos naturales al reducir la necesidad de extraer materias primas vírgenes y la dependencia de recursos fósiles [32]. Esto también ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que beneficia la sostenibilidad y reduce el impacto ambiental [19]. Al promover la reutilización de materiales, el reciclaje reduce el desperdicio y fomenta un ciclo de economía circular, que minimiza la generación de desechos y el consumo energético [39], [58], [59], [62]. En general, el reciclaje de plásticos ayuda a preservar los ecosistemas y a mitigar los efectos negativos de la contaminación plástica, promoviendo un uso más eficiente de los recursos y una menor huella de carbono [40], [45].

## V. DISCUSIÓN

En este estudio de revisión, el reciclaje de plásticos se presenta como un enfoque esencial para reducir la contaminación ambiental y minimizar el consumo de recursos naturales, en coherencia con los principios de la economía circular [28], [35], [56]. Los resultados muestran una concentración de investigaciones en Europa, especialmente en España, lo cual refleja un interés significativo en el desarrollo de tecnologías de reciclaje en esta región. Dicha tendencia evidencia un compromiso global con la sostenibilidad y la adaptación de tecnologías de reciclaje a diferentes contextos ambientales y económicos [16], [25], [30].

El análisis de los tipos de plásticos procesados revela que plásticos como el PET y el HDPE son ampliamente reciclados debido a sus propiedades químicas, que facilitan la creación de materiales reutilizables y combustibles. Sin embargo, otros plásticos, como el PVC, presentan limitaciones en ciertos procesos debido a su composición química. Esta clasificación es fundamental para maximizar la eficiencia del reciclaje y el valor de los productos obtenidos.

Los sectores económicos también tienen un papel relevante en la generación de residuos plásticos reciclables. El comercio y la agricultura destacan por sus aportes en el volumen de residuos, ofreciendo una oportunidad para implementar prácticas de reciclaje a gran escala. Sectores con menor generación de residuos plásticos podrían explorar mejoras en prácticas sostenibles para optimizar su contribución al reciclaje.

Existen diversas metodologías que van desde técnicas tradicionales, como el reciclaje mecánico, hasta innovaciones más avanzadas, como el reciclaje químico y la despolimerización, así como el uso de blockchain para asegurar la trazabilidad del proceso. El reciclaje mecánico es el más extendido, mientras que el reciclaje químico permite descomponer plásticos complejos que no son procesables por métodos convencionales [19], [25], [38], [56]. Estas metodologías representan un enfoque integral para abordar la problemática del reciclaje y contribuir al avance hacia una economía circular [42].

Por último, los avances tecnológicos en el reciclaje de plásticos han facilitado una recuperación más eficiente y sostenible de materiales, permitiendo la separación de plásticos complejos y mejorando la calidad de los materiales reciclados. Estos desarrollos han ayudado a reducir el uso de materias primas vírgenes y minimizar el volumen de residuos plásticos en vertederos, promoviendo un ciclo de economía circular [52], [61].

## VI. CONCLUSIONES

Los avances tecnológicos en el reciclaje de plásticos representan una solución clave para abordar los retos

ambientales de la contaminación plástica. Estas innovaciones permiten mejorar la eficiencia de los procesos de reciclaje, reduciendo residuos y contribuyendo a la transición hacia una economía circular que favorece el desarrollo sostenible.

Los métodos empleados en el reciclaje, como el mecánico, químico y tecnologías emergentes como el tratamiento térmico avanzado y la geopolimerización, ofrecen flexibilidad para procesar diversos tipos de plásticos. Esto maximiza el aprovechamiento de los recursos y permite obtener productos reciclados de calidad.

Las características de los productos reciclados dependen significativamente de la calidad de los materiales de entrada y de los parámetros operativos. Optimizar estos aspectos es crucial para garantizar que los materiales reciclados cumplan con los estándares técnicos y ambientales.

La reducción de la huella de carbono y el consumo energético en los procesos de reciclaje dependen en gran medida de la adopción de tecnologías innovadoras. Estas permiten minimizar el impacto ambiental, lo que refuerza su importancia dentro de las estrategias globales de sostenibilidad.

En definitiva, el éxito del reciclaje de plásticos radica en combinar tecnología avanzada, optimización de procesos y una visión global que prioriza la sostenibilidad. Esto permitirá no solo reducir la contaminación plástica, sino también transformar los residuos en recursos valiosos para las futuras generaciones.

## REFERENCIAS

- [1] G. Chen et al., "Reemplazar los plásticos tradicionales por plásticos biodegradables: impacto en las emisiones de carbono" *Ingeniería*, vol. 32, pp. 152-162, enero 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.002>
- [2] J. Di, B. K. Reck, A. Miatto, and T. E. Graedel, "Plásticos en Estados Unidos: grandes flujos, corta vida útil y reciclaje insignificante," *Reciclaje de Recursos y Conservación*, vol. 167, Art. 105440, 2021. DOI: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344921000471>
- [3] F. Bauer and G. Fontenit, "Dinosaurios de plástico: profundizando en el creciente bloqueo de carbono de los plásticos," *Política Energética*, vol. 156, Art. 112418, 2021. DOI: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421521002883>
- [4] R. Geyer, JR. Jambeck, y KL. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made," *\*Sci. Adv\**, vol. 3, no. 7, pp. e1700782, Julio. 2017. DOI: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>
- [5] Bonilla García DY. El reciclaje como estrategia didáctica para la conservación ambiental (Proyecto en ejecución). *Revista Científic*. 2016; 1(1):36-52. DOI: <https://doi.org/10.29394/scientific.issn.2542-2987.2016.1.1.36-52>
- [6] A. Abraham Park H, Choi O. Codigestión anaeróbica de bioplásticos como modo sostenible de gestión de residuos con mejor producción de energía: una revisión. *Tecnol Biorrecursos*. 2021;322 artículo 124537. DOI: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852420318113>
- [7] W.C. Li y L. Fok, "Residuos plásticos en el medio marino: una revisión de las fuentes, la aparición y los efectos," *Ciencia del Medio Ambiente Total*, vol. 566-567, pp. 333-349, Octubre. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084>
- [8] Sardon, H.; Dove, AP Reciclaje de plásticos con una diferencia. *Science* 2018, 360, 380-381. DOI: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aat4997>
- [9] G. Xu, L. Hou, and P. Wu, "State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, College of Chemistry and

- Chemical Engineering, Donghua University," *Advanced Science*, vol. 2405301, pp. 1-8, 2024. DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/advs.202405301>.
- [10] C. Moliner, G. Pasquale, y E. Arato, "Reciclaje de residuos plásticos municipales mediante pirogasificación," *\*Energies\**, vol. 17, pp. 1206, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17051206>
  - [11] WC. Li, HF. Tse, y L. Fok, "Marine plastic pollution in Hong Kong," *\*Sci. Total Environ.\**, vol. 566-567, pp. 333-349, Oct. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084>
  - [12] D. K. A. Barnes, F. Galgani, R. C. Thompson, and M. Barlaz, "Acumulación y fragmentación de desechos plásticos en entornos globales," *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 364, pp. 1985-1998, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
  - [13] Bátori V, Åkesson D, Zamani A. Degradación anaeróbica de bioplásticos: una revisión. *Gestión Residuos*. 2018; 80:406-13. DOI: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X18305816>
  - [14] Moliner, C.; Pasquale, G.; Arato, E. Reciclaje de residuos plásticos municipales mediante pirogasificación. *Energies* 2024, 17, 1206. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17051206>
  - [15] B. A. Rabin, J. Cakici, C. A. Golden, P. A. Estabrooks, R. E. Glasgow, and B. Gaglio, "A citation analysis and scoping systematic review of the operationalization of the Practical, Robust Implementation and Sustainability Model (PRISM)," *Implementation Science*, vol. 17, no. 1. BioMed Central Ltd, Dec. 01, 2022. DOI: <https://implementationscience.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13012-022-01234-3>
  - [16] A. Vlasopoulos, J. Malinauskaitė, A. Žabnieńska-Góra y H. Jouhara, "Life cycle assessment of plastic waste and energy recovery", *Energy*, p. 127576, abril de 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127576>
  - [17] H. Jayawardane, I. J. Davies, J. R. Gamage, M. John y W. K. Biswas, "Additive manufacturing of recycled plastics: a 'techno-eco-efficiency' assessment", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, marzo de 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11169-8>
  - [18] M. Z. U. Haq, H. Sood, R. Kumar y L. Ricciotti, "Sustainable geopolymers from polyethylene terephthalate waste and industrial by-products: a comprehensive characterisation and performance predictions", *J. Mater. Sci.*, febrero de 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09447-1>
  - [19] C. C. Uzosike, L. H. Yee y R. V. Padilla, "Small-Scale Mechanical Recycling of Solid Thermoplastic Wastes: A Review of PET, PE, and PP", *Energies*, vol. 16, n.º 3, p. 1406, enero de 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16031406>
  - [20] M. Arun, D. Barik y S. S. R. Chandran, "Exploration of material recovery framework from waste – A revolutionary move towards clean environment", *Chem. Eng. J. Advances*, vol. 18, p. 100589, mayo de 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.100589>
  - [21] J. Teltschik et al., "Review on recycling of carbon fibre reinforced thermoplastics with a focus on polyetheretherketone", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.*, p. 108236, abril de 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108236>
  - [22] A. Ramos, "Sustainability assessment in waste management: An exploratory study of the social perspective in waste-to-energy cases", *J. Cleaner Prod.*, vol. 475, p. 143693, octubre de 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143693>
  - [23] M. Martín-Gamboa, L. D. Allegue, D. Puyol, J. A. Melero y J. Dufour, "Environmental life cycle assessment of polyhydroxyalkanoates production by purple phototrophic bacteria mixed cultures", *J. Cleaner Prod.*, vol. 428, p. 139421, noviembre de 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139421>
  - [24] M. Galindo, E. Alberdi, M. A. Sánchez-Burgos, F. J. Nieves y I. Flores-Colen, "Polypropylene as an absorber layer for acoustic ceilings: Sound absorption and life cycle assessment", *J. Building Eng.*, vol. 96, p. 110655, noviembre de 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110655>
  - [25] L. B. Dollischek, P. Frohn-Sörensen, F. Kurz y B. Engel, "Injection molding of post-industrial recycled glass fiber reinforced polyphenylene sulfide in the context of an industrial feasibility study", *J. Cleaner Prod.*, p. 143416, agosto de 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143416>
  - [26] B. Biakhmetov et al., "Comparing carbon-saving potential of the pyrolysis of non-recycled municipal plastic waste: Influences of system scales and end products", *J. Cleaner Prod.*, vol. 469, p. 143140, septiembre de 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143140>
  - [27] J. A. Araujo et al., "Biotechnological model for ubiquitous mixed petroleum- and bio-based plastics degradation and upcycling into bacterial nanocellulose", *J. Cleaner Prod.*, p. 141025, febrero de 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141025>
  - [28] L. Mei y Z. F. Min, "Innovations for sustainable chemical manufacturing and waste minimization through green production practices", *High Temp. Mater. Processes*, vol. 43, n.º 1, enero de 2024. Disponible: <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0318>
  - [29] M. Arifuzzaman et al., "Selective deconstruction of mixed plastics by a tailored organocatalyst", *Mater. Horiz.*, 2023. Accedido el 2 de diciembre de 2024. [En línea]. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3mh00801k>
  - [30] K. Bułkowska, M. Zielińska y M. Bułkowski, "Blockchain-Based Management of Recyclable Plastic Waste", *Energies*, vol. 17, n.º 12, p. 2937, junio de 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17122937>
  - [31] K. Bułkowska, M. Zielińska y M. Bułkowski, "Implementation of Blockchain Technology in Waste Management", *Energies*, vol. 16, n.º 23, p. 7742, noviembre de 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16237742>
  - [32] C. Soenmez, V. Venkatachalam, S. Spierling, H.-J. Endres y L. Barner, "Environmental potential of recycling of plastic wastes in Australia based on life cycle assessment", *J. Mater. Cycles Waste Manage.*, febrero de 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01901-1>
  - [33] U. R. Gracida-Alvarez, P. T. Benavides, U. Lee y M. Wang, "Life-cycle analysis of recycling of post-use plastic to plastic via pyrolysis", *J. Cleaner Prod.*, p. 138867, septiembre de 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138867>
  - [34] G. Baralla, A. Pinna, R. Tonelli y M. Marchesi, "Waste management: A comprehensive state of the art about the rise of blockchain technology", *Comput. Industry*, vol. 145, p. 103812, febrero de 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103812>
  - [35] Bernat, K. (2023). Post-Consumer Plastic Waste Management: From Collection and Sortation to Mechanical Recycling. *Energies*, 16(8), 3504. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16083504>
  - [36] Bharadwaj, S. K., Jaudan, M., Kushwaha, P., Saxena, A., & Saha, B. (2024). Exploring Cutting-Edge Approaches in Plastic Recycling for a Greener Future. *Results in Engineering*, 102704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102704>
  - [37] Chen, G., Li, J., Sun, Y., Wang, Z., Leeke, G. A., Moretti, C., Cheng, Z., Wang, Y., Li, N., Mu, L., Li, J., Tao, J., Yan, B., & Hou, L. (2023). Replacing Traditional Plastics with Biodegradable Plastics: Impact on Carbon Emissions. *Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.002>
  - [38] González Romero, I., Buldeo Rai, H., Ortiz Bas, Á., & Prado Prado, J. C. (2024). Can reusable packaging revolutionise e-commerce? Unveiling the environmental impact through a comparative carbon footprint analysis. *Journal of Cleaner Production*, 476, 143738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143738>
  - [39] Makepa, D. C., Chihobo, C. H., Manhongo, T. T., & Musademba, D. (2023). Life-cycle assessment of microwave-assisted pyrolysis of pine sawdust as an emerging technology for biodiesel production. *Results in Engineering*, 101480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101480>
  - [40] Shih, Y.-F., Chang, C.-W., Hsu, T.-H., & Dai, W.-Y. (2024). Application of Sustainable Wood-Plastic Composites in Energy-Efficient Construction. *Buildings*, 14(4), 958. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14040958>
  - [41] Traven, L. (2023). Sustainable energy generation from municipal solid waste: A brief overview of existing technologies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100491>
  - [42] Pellengahr, F., Ghannadzadeh, A., & van der Meer, Y. (2023). How accurate is plastic end-of-life modeling in LCA? Investigating the main assumptions and deviations for the end-of-life management of plastic packaging. *Sustainable Production and Consumption*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.09.014>
  - [43] Szostak, E., Duda, P., Duda, A., Górska, N., Fenicki, A., & Molski, P. (2020). Characteristics of Plastic Waste Processing in the Modern

- Recycling Plant Operating in Poland. *Energies*, 14(1), 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14010035>
- [44] Namkung, H., Park, S.-I., Lee, Y., Han, T. U., Son, J.-I., & Kang, J.-G. (2022). Investigation of Oil and Facility Characteristics of Plastic Waste Pyrolysis for the Advanced Waste Recycling Policy. *Energies*, 15(12), 4317. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124317>
- [45] Nañez Alonso, S. L., Reier Forradellas, R. F., Pi Morell, O., & Jorge-Vazquez, J. (2021). Digitalization, Circular Economy and Environmental Sustainability: The Application of Artificial Intelligence in the Efficient Self-Management of Waste. *Sustainability*, 13(4), 2092. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13042092>
- [46] Horodytska, O., Kiritsis, D., & Fullana, A. (2020). Upcycling of printed plastic films: LCA analysis and effects on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122138>
- [47] Matthews, C., Moran, F., & Jaiswal, A. K. (2021). A review on European Union's strategy for plastics in a circular economy and its impact on food safety. *Journal of Cleaner Production*, 283, 125263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125263>
- [48] Pegoretti, A. (2021). Recycling concepts for short-fiber-reinforced and particle-filled thermoplastic composites: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(2), 93–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.03.004>
- [49] Juan, R., Domínguez, C., Robledo, N., Paredes, B., & García-Muñoz, R. A. (2020). Incorporation of recycled high-density polyethylene to polyethylene pipe grade resins to increase close-loop recycling and Underpin the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124081. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124081>
- [50] Pudack, C., Stepanski, M., & Fässler, P. (2020). PET Recycling – Contributions of Crystallization to Sustainability. *Chemie Ingenieur Technik*, 92(4), 452–458. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201900085>
- [51] Zhao, X., Korey, M., Li, K., Copenhaver, K., Tekinalp, H., Celik, S., Kalaitzidou, K., Ruan, R., Ragauskas, A. J., & Ozcan, S. (2022). Plastic waste upcycling toward a circular economy. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131928>
- [52] Majgaonkar, P., Hanich, R., Malz, F., & Brüll, R. (2021). Chemical Recycling of Post-Consumer PLA Waste for Sustainable Production of Ethyl Lactate. *Chemical Engineering Journal*, 423, 129952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129952>
- [53] Cardamone, G. F., Ardolino, F., & Arena, U. (2022). Can plastics from end-of-life vehicles be managed in a sustainable way? *Sustainable Production and Consumption*, 29, 115–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.09.025>
- [54] Briassoulis, D., Pikasi, A., & Hiskakis, M. (2020). Recirculation potential of post-consumer /industrial bio-based plastics through mechanical recycling - Techno-economic sustainability criteria and indicators. *Polymer Degradation and Stability*, 109217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109217>
- [55] Cruz Sanchez, F. A., Boudaoud, H., Camargo, M., & Pearce, J. M. (2020). Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602>
- [56] Kakadellis, S., & Harris, Z. M. (2020). Don't scrap the waste: The need for broader system boundaries in bioplastic food packaging life-cycle assessment – A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122831>
- [57] Fatimah, Y. A., Govindan, K., Murniningsih, R., & Setiawan, A. (2020). Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122263>
- [58] Cucuzza, P., Serranti, S., Bonifazi, G., & Capobianco, G. (2021). Effective Recycling Solutions for the Production of High-Quality PET Flakes Based on Hyperspectral Imaging and Variable Selection. *Journal of Imaging*, 7(9), 181. DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging7090181>
- [59] Abdissa, G., Ayalew, A., Dunay, A., & Illés, C. B. (2022). Role of Reverse Logistics Activities in the Recycling of Used Plastic Bottled Water Waste Management. *Sustainability*, 14(13), 7650. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14137650>
- [60] Beltrán, F. R., Infante, C., de la Orden, M. U., & Martínez Urreaga, J. (2019). Mechanical recycling of poly(lactic acid): Evaluation of a chain extender and a peroxide as additives for upgrading the recycled plastic. *Journal of Cleaner Production*, 219, 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.206>
- [61] Istrate, I.-R., Juan, R., Martín-Gamboa, M., Domínguez, C., García-Muñoz, R. A., & Dufour, J. (2021). Environmental life cycle assessment of the incorporation of recycled high-density polyethylene to polyethylene pipe grade resins. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128580>
- [62] Burra, K. R. G., Liu, X., Wang, Z., Li, J., Che, D., & Gupta, A. K. (2021). Quantifying the sources of synergistic effects in co-pyrolysis of pinewood and polystyrene. *Applied Energy*, 302, 117562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117562>
- [63] Infante-Alcalde, J., & Valderrama-Ulloa, C. (2019). Análisis Técnico, Económico y Medioambiental de la Fabricación de Bloques de Hormigón con Polietileno Tereftalato Reciclado (PET). *Información tecnológica*, 30(5), 25–36. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000500025>