

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS POR MEDIO DE LA OBTENCIÓN DE
FIBRAS, BIODEGRADACIÓN Y LA PIROLISIS PARA EL FOMENTO DE LA ECONOMÍA
CIRCULAR

BRAYAN ESTIBEN OSORIO VARGAS

Proyecto integral de grado para optar el título de
ESPECIALISTA EN GESTION AMBIENTAL

Director

DIANA CAROLINA GARZÓN VELASCO

Ingeniero Ambiental

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre del director

Firma del Director

Nombre

Firma del presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. marzo de 2023

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada Garcia-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora de programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS	12
1.1. Objetivo general.	12
1.2. Objetivos específicos.	12
2. ANTECEDENTES	13
3. MARCO CONCEPTUAL	14
3.1. Plástico	14
3.2. Parámetros fisicoquímicos de los residuos plásticos	14
3.3. Fibras	15
3.4. Biodegradación	16
3.5. Pirólisis	16
3.6. Economía circular	17
4. MARCO LEGAL	18
4.1. Residuos sólidos	18
4.2. Aprovechamiento de los residuos plásticos (GTC 52)	18
4.3. NTC 3205	19
5. MARCO TEÓRICO	21
5.1. Problemática a nivel mundial	21
5.2. Problemática en Colombia	22
6. METODOLOGÍA	23
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	24
7.1. El proceso de conversión de botellas PET a fibra corta de poliéster	24

7.1.1. <i>Inspección</i>	24
7.1.2. <i>Lavado</i>	24
7.1.3. <i>Secado</i>	24
7.1.4. <i>Fundido, filtrado y extrusión para hilatura</i>	25
7.1.5. <i>Estiramiento</i>	25
7.1.6. <i>Rizado (crimpado) y secado</i>	25
7.1.7 <i>Cortado y embalado</i>	26
7.2. Biodegradación del polietileno	26
7.3. Pirolisis de residuos plásticos	28
7.4. Comparativa entre métodos	30
8. CONCLUSIONES	38
BIBLIOGRAFÍA	39

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1 Codificación y usos de los tipos de plásticos	20
Figura 2 Producción Anual de plástico	21
Figura 3 Diagrama de proceso de la pirolisis	29
Figura 4 Categorías	31
Figura 5 Valoración de la importancia	32
Figura 6 Criterio “impacto ambiental”	32
Figura 7 : Criterio “Tiempo de duración del método”	33
Figura 8 Criterio “eficiencia”	34
Figura 9 Criterio “facilidad de implementación”	34
Figura 10 Criterio “tipo de plástico”	36

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1 Parámetros físico químicos	15
Tabla 2 Eficiencia de microorganismos	27
Tabla 3 Parámetros para le implementación de la pirolisis y los productos obtenido	30
Tabla 4 Resultados	36

RESUMEN

La creciente preocupación por los residuos plásticos y su impacto negativo en el medio ambiente ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles para su aprovechamiento. En este contexto, la pirolisis, la biodegradación de PET y la obtención de fibras a partir de PET han surgido como métodos prometedores para abordar este desafío global. Estos presentan diferentes enfoques y mecanismos para convertir los residuos plásticos en productos valiosos o reducir su impacto ambiental.

En este documento, se examinan los principios, los mecanismos de cada uno de estos métodos de aprovechamiento de residuos plásticos. Se analizan sus ventajas y limitaciones, así como su potencial para impulsar la transición hacia una economía más circular y sostenible. Asimismo, se busca promover la implementación de estrategias efectivas de gestión de residuos, que permitan mitigar los impactos negativos de los plásticos en el medio ambiente y avanzar hacia un futuro más sustentable.

Palabras clave: Tratamiento de residuos sólidos, economía circular, métodos de aprovechamiento, disposición de residuos plásticos.

INTRODUCCIÓN

La industria de los polímeros representa el 85% de la basura en el mar del Caribe proveniente de actividades terrestres, dichos residuos están compuestos en su mayoría por plásticos producto de los hábitos de consumo de la sociedad en la actualidad; esto provoca un problema de orden global dado la generación y disposición final de los residuos sólidos, los cuales normalmente son depositados o encontrados en sistemas naturales. Como un claro ejemplo es la contaminación de mares y océanos (Gutiérrez, 2022).

Recientemente se evidencia el aprovechamiento de los plásticos en diferentes sectores como lo son el etiquetado, producción de utensilios, artículos de oficina y actividades cuya utilidad permita la transformación de esta materia prima en productos de mayor valor agregado (Pablo & Pérez, n.d.).

Por otro lado, la incorrecta disposición del plástico puede generar contaminación en diferentes aspectos. En primer lugar, el agotamiento de suelos, también la contaminación que se genera en los ecosistemas lenticos y loticos produciendo acumulación de desechos, además la creación de micro plásticos los cuales se remueven difícilmente en las plantas de tratamiento de aguas residuales debido a que son pequeños, flotan y son fácilmente arrastrados por las aguas residuales a los cuerpos de agua (Sarria & Gallo, 2016).

Por consiguiente, el aumento de la generación de plástico contribuye al cambio climático, ya que estos materiales poseen propiedades sintéticas y no tiene un proceso de degradación como de un árbol, seda o algodón que cuentan con un ciclo de vida que permite su degradación de forma natural. Asimismo, los plásticos tienen un ciclo de vida de más de seis mil años y se destaca que la mayoría de plásticos son hidrocarburos con un fuerte enlace carbono-carbono, por esta razón son dispuestos en vertederos (Perdomo M Fundacite-Mérida et al., n.d.).

Uno de los problemas asociados a los rellenos sanitarios es el agotamiento por el exceso de residuos que son dispuestos, generando consecuencias tales como el agotamiento de suelo, contaminación de aguas subterráneas por lixiviados, impactos negativos en salud y generación de emisiones de Metano y CO₂ (Ulloa, 2006).

Finalmente, en este trabajo se realizó una investigación de algunos mecanismos que puedan contribuir significativamente al aprovechamiento de los residuos plásticos, aprovechando los

plásticos mediante diferentes procesos como la elaboración de fibras, biodegradación y procesos de termólisis., dando como resultado una reducción significativa en la cantidad de residuos que tienen como disposición final vertederos. Cuyo objetivo es lograr la sostenibilidad en los procesos y el cambio de pensamiento de la sociedad priorizando la conservación y uso adecuado de recursos naturales renovables y no renovables.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Evaluar los métodos de aprovechamiento de residuos plásticos existentes tales como la obtención de fibras a partir de plástico, biodegradación y la pirolisis, aplicando un enfoque de economía circular.

1.2. Objetivos específicos

- Describir cómo funciona el método de obtención de fibras a partir de plástico, biodegradación y la pirolisis, para el de aprovechamiento de residuos plásticos.
- Comparar las metodologías de aprovechamiento de residuos plásticos tales como son la obtención fibras a partir de plástico, biodegradación y la pirolisis para su implementación.
- Determinar el tratamiento más viable en Colombia mediante el tipo de plástico generado.

2. ANTECEDENTES

El trabajo de José Aguado y colaboradores, (El papel de la Química en la valorización de los residuos plásticos), nos habla sobre las diferentes técnicas para el aprovechamiento de residuos sólidos, además de una descripción de las dificultades que tiene este para poder implementarse en los 5 principios de la economía circular, dado a conocer el reducido número de ciclos de función de los plásticos, utilizando como única gestión de estos el reciclaje mecánico. A su vez permitiendo conocer métodos no convencionales para el aprovechamiento de los plásticos como lo son agentes reductores en altos hornos, despolimerización química y termólisis.

Se concluyo que los tratamientos químicos son muy variables y la aplicación de estos depende directamente del tipo de polímero al que se quiera utilizar, a partir de estos se pueden obtener los monómeros originales mediante la acción de reactivos químicos. Por otro lado, la obtención de hidrocarburos líquidos y gaseosos con diferentes aplicaciones en la industria química. Los cuales son obtenidos a partir de pirolisis y gasificación. Por último, la viabilidad de los residuos sólidos como agente reductor en altos hornos actualmente está siendo implementado a nivel industrial en Europa y Japón (Aguado et al., 2011).

Un segundo trabajo corresponde a Shirley Dayanna Caballero-Ibarra y colaboradores, a través del artículo “The plastic and its two faces”, donde explican cómo ha sido el crecimiento del plástico desde su creación y como ha cambiado el uso de este, la disposición final de estos cuando no existe una correcta gestión de residuos, por otro lado, muestra el crecimiento exponencial que ha tenido en los últimos años y como va creciendo de forma paralela a la contaminación (Dayanna et al., 2020).

Como tercer antecedente Shafferina Dayana Anuar Sharuddin y colaboradores, a través de “A review on pyrolysis of plastic wastes”, nos aclara el proceso de la pirolisis de los plásticos y su caracterización, cuyo fin es determinar que tipos de plástico se pueden utilizar, por medio del uso de diferentes reactores, permitiendo realizar un análisis de eficiencia, condiciones de operación y tiempos de residencia del proceso (Anuar Sharuddin et al., 2016).

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1. Plástico

Los plásticos son materiales sintéticos los cuales están formados por polímeros de alto peso molecular, estos presentan una estructura básica orgánica la cual puede ser manipulada de manera química o física para la obtención de un producto que por lo general son de un solo uso, dándoles a estos una vida corta, las propiedades de estos varía según su composición, pero en términos generales son ligeros, inertes, resistentes y económicos tanto en producción y venta (Alethia et al., 2016).

Es importante destacar, que el plástico tiene un impacto en la vida productiva en el mundo y que sustituirlo generaría una ineficiencia en la vida productiva, convirtiéndose en un problema a nivel mundial dado las afectaciones que tiene para el medio ambiente y la salud. Esto se genera principalmente dado la durabilidad de los polímeros ya que estos tardan siglos en degradarse y tienden a acumularse en el medio ambiente contaminando suelos, aire y fuentes hídricas. Estas últimas, por foto degradación son convertidos en micro plásticos los cuales acaban siendo ingeridos por animales e incorporándose en la cadena trófica (B. Ignacio & Mercedes, n.d.).

3.2. Parámetros fisicoquímicos de los residuos plásticos

Existen siete tipos principales de plásticos, los cuales son PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS y otros plásticos. El PET se destaca por su rigidez, resistencia al impacto y a la humedad. El HDPE es reconocido por su excelente resistencia a la tracción, rigidez y por su alto punto de fusión. El PVC ofrece flexibilidad, resistencia a productos químicos. El LDPE se caracteriza por ser resistente, ligero y suave. El PP destaca por su resistencia al agua, fatiga y ser aislante. El PS se caracteriza por ser rígido, transparente u opaco. Por último, los otros plásticos engloban variedades como por el ejemplo el PC y ABS, con propiedades específicas para aplicaciones particulares.

Por otro lado, en la siguiente tabla se puede evidenciar algunas de las propiedades asociadas a estos polímeros (Sangar, 2023).

Tabla 1.*Parámetros físico químicos*

Tipo de plástico	Densidad (g/cm ³)	Punto de fusión (°C)	Resistencia a la tracción (MPa)	Absorción de agua (%)	Resistencia química
Polietileno tereftalato	1,38	250-260°C	50-80	Bajo (< 0,5)	Buena resistencia a la mayoría de los productos químicos, excepto ácidos y bases fuertes.
Polietileno de alta densidad	0,93-0,97	120-180°C	20-40	Deficiente (< 0,01)	Excelente resistencia a la mayoría de los productos químicos, incluidos ácidos, bases y disolventes.
Cloruro de Polivinilo	1,35-1,45	100-260°C	40-60	Bajo (< 0,5)	Buena resistencia a la mayoría de los productos químicos, excepto cetonas, hidrocarburos clorados y algunos aromáticos.
Polietileno de baja densidad	0,910-0,940	105-115	oct-25	Muy bajo (< 0,01)	Excelente resistencia a la mayoría de los productos químicos, incluidos ácidos, bases y disolventes.
Polipropileno	1,04 – 1,06	160-168	---	---	---
Poliestireno	1,05 – 1,06	210-249	53	----	----

Tabla 1 Parámetros físico químicos

Nota. La tabla muestra algunas de las propiedades físico químicas de los polímeros. Tomado de. Sangar, H. (2023). 7 Types of Plastics _ A Helpful Illustrated Guide - PlasticRanger. Disponible en <file:///C:/Users/STEVEN/Documents/9%20semestre/Pagos%20Pos%20Grado/parte%202%20del%20posgrado/Asignaturas/Seminario%20De%20Grado/Trabajo%20de%20grado/Referencias/Marco%20conceptual/11.html>

3.3. Fibras

Se refiere a un grupo de hebras que tienen la capacidad de convertirse en hilo, lo cual es fundamental para la industria textil y de la moda. En estas industrias se emplean métodos como el hilado y se aplican tratamientos químicos u otros procesos. En resumen, la fibra textil representa el componente esencial de los tejidos. En términos generales, se considera útil cualquier hebra

cuya longitud sea mayor que su diámetro y que pueda ser convertida en hilo (*Escuela Europea Versailles, 2022*).

Pueden ser naturales, sintéticas o artificiales estas a su vez son utilizadas para proceso de hilado, tejido y en la manufactura de prendas de vestir. Las fibras pueden ser de origen vegetal o animal, de estas se extraen fibras como el algodón, seda, lana, entre otros (Edward, 2004).

La historia de las fibras se remonta al siglo XVIII. Donde las fibras eran elaboradas a partir de celulosa o productos derivados de petróleo, estas tienen más áreas de implementación debido a las propiedades que estas presentan y que no son posibles alcanzar con las fibras naturales como la seda, lino y el algodón. Teniendo en cuenta la variedad de fibras que existen y sus orígenes es importante implementar métodos donde sean un impulso para el reciclaje textil. dada la necesidad de generar nuevos productos a partir de materiales reciclados como lo es el plástico e incluso se puede llegar a cambiar la materia prima asociada a la producción de fibras (Cabello-Alvarado et al., 2019).

3.4. Biodegradación

Es un proceso natural en donde organismos vivos como lo son bacterias, hongos y otros microorganismos se encargan de descomponer material en dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), Agua (H₂O) y constituyentes orgánicos. Dicha degradación puede ser térmica, mecánica, química y biológica, Además, este proceso posee diferentes medios o formas de aplicación y depende los factores o condiciones del material a degradar. También se debe tener en cuenta aspectos como lo es la tensión superficial, porosidad, el tipo de microorganismo y las condiciones que requiera el mismo para que el proceso ocurra. puede ser la temperatura, potencial redox, PH y fuentes de energía (Gómez Ayala & Yory Sanabria, 2018).

3.5. Pirólisis

La pirólisis implica la descomposición térmica de moléculas grandes en ausencia de oxígeno, a temperaturas que oscilan entre 400 °C y 1000 °C. Este procedimiento produce diferentes fracciones, como gases, líquidos y sólidos, que pueden tener aplicaciones diversas. Las fracciones líquidas resultantes, como metano, etileno, propileno y benceno, pueden ser recicladas o utilizadas como combustible en la industria petroquímica (S. Ignacio, 2008).

En la pirólisis térmica, al aplicar calor a los residuos plásticos, se genera energía como resultado. Debido al alto valor calorífico del plástico, se utiliza como combustible en diversos procesos. Esta técnica permite aprovechar todo tipo de plásticos, incluso aquellos que presenten daños visibles o suciedad, como los envases agrícolas o los desechos sólidos urbanos. En comparación con los métodos de reciclaje químico o mecánico, la pirólisis se considera una alternativa más respetuosa con el medio ambiente (Merchán & Cabrera, 2014)

La pirólisis catalítica ofrece diversas ventajas en comparación con la pirólisis térmica. Una de estas ventajas es la disminución del consumo de energía y la obtención de materiales con una distribución más precisa del número de carbonos en los hidrocarburos aromáticos. La pirólisis convencional requiere una gran cantidad de energía debido a la baja conductividad térmica del polímero y al aumento de calor durante la descomposición. En respuesta a esto, se han desarrollado tecnologías catalíticas que facilitan la descomposición a bajas temperaturas, lo que a su vez reduce el consumo de energía (Fardy, 2020)

3.6. Economía circular

La economía circular de los plásticos es un modelo de sistema cerrado que promueve la reutilización de productos plásticos, genera valor a partir de los residuos y evita el envío de plásticos recuperables a los vertederos. Para el desarrollo de la economía circular se deben conocer los campos de acción como son la extracción, el uso eficiente de recursos extraídos del ambiente. Además, está la transformación del recurso extraído en el que se busca tener prácticas tecnológicas sostenibles, una vez obtenido el producto se debe garantizar que la distribución a clientes sea eficiente teniendo en cuenta rutas y logística de las mismas (Prieto-Sandoval et al., 2017).

Finalmente, la recuperación en el entorno puede tener dos medios: como recurso biológico o industrial. Cabe destacar la gran relevancia que tiene el mercado para la economía circular separándose estos en tres niveles, el primer nivel micro o individual, donde las empresas se centran en la mejora continua de sus procesos, la transición a energías limpias, implementación de eco-etiquetado entre otros, el segundo nivel llamado meso. busca generar asociaciones o interacciones para la revalorización de recursos conocidas como simbiosis interorganizaciones, por último, tenemos el nivel macro que se enfoca en desarrollos regionales como por ejemplo las eco-ciudades (Prieto-Sandoval et al., 2017).

4. MARCO LEGAL

4.1. Residuos sólidos

El decreto 1713 de 2002 define los desechos sólidos como cualquier objeto, material, sustancia o elemento en estado sólido resultante del consumo o uso de un producto en actividades como el hogar, la industria, el comercio, instituciones y servicios. Estos desechos son abandonados, rechazados o entregados por el generador y tienen la capacidad de ser aprovechados o transformados en un nuevo producto con valor económico, o bien, deben ser dispuestos de manera permanente (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2002).

Se clasifican en dos categorías: en primer lugar, residuos sólidos aprovechables, los cuales son materiales, sustancias o elementos sólidos que no tienen valor de uso directo o indirecto para quien los genera, pero que pueden ser incorporados en otros procesos productivos; luego los residuos sólidos no aprovechables, que son materiales o sustancias sólidas o semisólidas de origen orgánico e inorgánico, ya sean biodegradables o no, Estos últimos carecen de valor comercial, por lo que requieren tratamiento y disposición final (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2002).

El decreto 1077 de 2015 Sector Vivienda, Ciudad y Territorio este establece disposiciones relacionadas con el manejo integral de residuos sólidos en el sector vivienda, ciudad y territorio. Dentro de sus lineamientos, se abordan aspectos como la clasificación, la recolección, el transporte, el tratamiento y la disposición final de los residuos sólidos. Además, el decreto establece criterios y obligaciones para promover la separación en la fuente y la implementación de programas de aprovechamiento y reciclaje (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2015).

4. 2. Aprovechamiento de los residuos plásticos (GTC 52)

Esta Guía propone un enfoque paso a paso basado en el principio del enfoque de ciclo de vida con el fin de promover una reducción de los impactos ambientales adversos potenciales causados por los productos algunas de las tecnologías más utilizadas para el aprovechamiento de los residuos plásticos son:

Posindustrial o primario. El cual busca reutilizar o reciclar materiales dentro del proceso mecánico posconsumo o secundario el cual consiste en la transferencia de materiales fuera del sitio

para reutilización o reciclaje. El Terciario consiste en la recuperación de energía de los flujos de residuos en el sitio o fuera de él, tratamiento de emisiones y vertidos de residuos en el sitio y fuera de él, para reducir sus impactos ambientales (ICONTEC, 2010).

4.3. NTC 3205

Según la norma técnica Colombia 3205 de 2021 se establece un sistema de codificación para los artículos de plástico, tal como se puede apreciar en la siguiente tabla donde describe los diferentes plásticos que existen según sus características.

Figura 1.

Codificación y usos de los tipos de plásticos “cuadro”

Tipo de plástico	Código (NTC 3205)	Usos comunes	Formas de identificarlos
Poliétileno tereftalato		Botellas de bebidas, envases farmacéuticos, empaques aluminizados	La botella tiene un punto en la base. Al sumergirlo en agua se hunde. Al quemarlo se funde y gotea, presenta una llama color naranja-amarilla con olor aromático e irritante
Poliétileno de alta densidad		Cajas o canastas, botellas de jabón, tinas, juguetes	Los envases y bolsas son de color lechoso. Al sumergirlo en agua flota. Al quemarlo se funde y gotea, presenta una llama amarilla con olor a parafina
Cloruro de Polivinilo		Tubería, cuero sintético, tarjetas bancarias, envases	La botella tiene una costura en forma de arco en la base y al compactarla aparece una línea blanca. Al sumergirlo en agua se hunde. Al quemarlo presenta humo verdoso con olor irritante.
Poliétileno de baja densidad		Bolsas, mangueras, láminas adhesivas, juguetes	Los empaques son blandos y las bolsas son elásticas y resistentes. Al sumergirlo en agua flota. Al quemarlo se funde y gotea, presenta una llama azul con olor a parafina
Polipropileno		Empaques flexibles, utensilios domésticos, muebles	Al sumergirlo en agua flota. Al quemarlo se funde y gotea, presenta humo blanco con olor a parafina y aceite quemado
Poliestireno		Vasos, platos desechables, neveras (Icopor), cajas para CD	Es quebradizo por su alta rigidez. Al sumergirlo en agua flota. Al quemarlo se funde pero no gotea, presenta una llama amarilla y humo negro con olor dulce
Otros Policarbonato PC Acrilnitrilobutaniero estireno ABC Poliamida Nylon Acetales		Botellones para agua, CD, espumas, recubrimientos, adhesivos	Depende de cada material

Figura 1 Codificación y usos de los tipos de plásticos

Nota. La figura muestra el sistema de codificación de los plásticos, el uso de estos y como identificarlos. Tomado de guía para plásticos. sistema de codificación, 2021.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Problemática a nivel mundial

En 2021 se ha producido más de 390,7 Mt en todo el mundo, dónde 90,2% de la producción está asociado a polímeros de origen fósil, 8,3% son plásticos de posconsumo y apenas el 1,5% de estos son de origen biológico o bio atribuidos, Consecuencia de ello, gran parte de la biodiversidad se ve afectada por la contaminación, considerando que los plásticos al tener una vida útil prolongada no permite la degradación y genera acumulación de emisiones de CO₂ que son emitidos a la atmósfera causando daños irreversibles por efecto invernadero (Europe Plastics, 2022) en el siguiente grafico podemos observar la cantidad de plástico producido según su tipo.

Figura 2.

Producción Anual de plástico

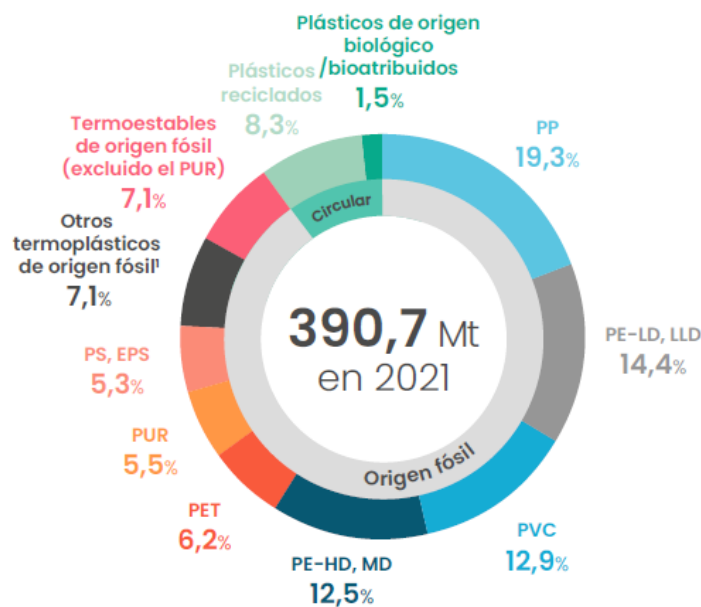


Figura 2 Producción Anual de plástico

Nota. La figura ilustra la distribución de la producción mundial de plásticos por tipo. Tomado de Europe Plastics. (2022). Plásticos - Situación en 2022.

5.2. Problemática en Colombia

En el mercado colombiano, los productos plásticos tienen una amplia presencia. El consumo per cápita de plástico alcanza aproximadamente los 24 kg per cápita, lo que se traduce en un volumen anual de consumo de alrededor de 1.250.000 toneladas. La mayoría de este consumo (alrededor del 56%) corresponde a plásticos de un solo uso. (Cortes Daza, 2022)

Como empaques, embalajes y botellas PET. A nivel nacional, el país genera anualmente unos 12 millones de toneladas de residuos sólidos, de los cuales solo se recicla un 17%. Gran parte de los envases plásticos, aproximadamente el 74%, terminan en los rellenos sanitarios. En el caso específico de Bogotá, se generan alrededor de 7.500 toneladas de residuos diarios, y se recicla entre el 14% y el 15% de dicha cantidad. Un ciudadano colombiano utiliza aproximadamente seis bolsas plásticas a la semana, lo que se traduce en 288 bolsas al año y 22.176 bolsas en un promedio de vida de 77 años. Esto resulta en una producción de aproximadamente 1,8 toneladas de residuos plásticos al final de los 77 años de esperanza de vida (Carolina, 2020).

En Colombia, todavía hay 124 municipios que son principalmente rurales y que tienen lugares de disposición final inadecuados. Entre estos municipios se encuentran los departamentos de Bolívar, con 27 municipios; Chocó, con 17 municipios; Magdalena, con 17 municipios; y Cauca, con 10 municipios. Estos lugares de disposición final inapropiados permiten que los residuos plásticos se filtren hacia los ecosistemas colombianos (MARÍA, 2018).

Por tal motivo es de carácter prioritario encontrar estrategias que permitan aprovechar los recursos derivados de la industria de los plásticos, a su vez, dichas tecnologías deben ser altamente adaptables con el cambio climático para la conservación de la biota y sus diferentes ecosistemas, por otro lado, se busca plantear alternativas de negocio con base a la creciente economía circular.

6. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del documento se realizó una búsqueda y recopilación de información mediante repositorios de la universidad y la revisión de literatura científica, informes técnicos y estudios relacionados.

Se detallaron los procesos y principios fundamentales de cada uno de los tratamientos analizados. En primer lugar para la obtención de fibras a partir de PET se describió el proceso de reciclaje mecánico. En segundo lugar, Para la biodegradación, se explicaron los mecanismos biológicos involucrados. Por último, para la pirolisis, se detalló el proceso de descomposición térmica del plástico.

Seguidamente se realizó una comparación de las metodologías de los métodos mencionados. Para ello, se establecieron criterios relevantes como el impacto ambiental, el tiempo de duración del método, la eficiencia, la facilidad de implementación y los tipos de plástico que pueden ser utilizados en cada método. Empleando herramientas como el software SuperDecisions con el cual se realizó una evaluación cuantitativa. Estos criterios se seleccionaron con base en su relevancia para la aplicación en Colombia y su contribución a la sostenibilidad.

Finalmente, se analizaron y compararon los resultados de las evaluaciones cuantitativas. Con base en esta comparación, se identificó el método de tratamiento más viable y adecuado para el contexto colombiano, considerando las necesidades locales, los recursos disponibles y las implicaciones ambientales y económicas. Teniendo en cuenta el enfoque hacia la economía circular.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, describiremos algunas de las tecnologías empleadas comúnmente para la transformación de los productos a base de polímeros en productos con un mayor valor agregado teniendo en cuenta el enfoque hacia la economía circular y sostenibilidad aprovechando eficientemente los recursos.

7.1. El proceso de conversión de botellas PET a fibra corta de poliéster

La obtención de fibras a partir de plástico se desarrolla gracias una operación denominada scrap, de botellas PET trasparente para ello, se implementa un proceso de selección del tipo de botellas, color, se retira el etiquetado y un control de calidad del material, con el fin de garantizar la eliminación de impurezas posteriormente ser trituradas y obtener un tipo de hojuelas granuladas una vez obtenido el scrap se procede con los siguientes procesos.

7.1.1. Inspección

Este es un proceso altamente analizado y controlado dado que una alteración en la calidad puede repercutir en la pérdida de material y producto por esta misma razón se realiza una apropiada selección de scrap de PET. Esto se logra con una adecuada selección de proveedores los cuales deben suministrar un insumo con los estándares de calidad requeridos. seguidamente la materia prima se somete nuevamente a un proceso de inspección y limpieza del material para evitar la presencia de materiales no deseables tales como residuos no plásticos, restos metálicos, cartón, etc (FOROAMBIENTAL, 2023).

7.1.2. Lavado

Previo al proceso de inspección se realiza un lavado con agua a presión con proporciones adecuadas de detergentes industriales, para que el proceso sea más eficiente el scrap es depositado en un recipiente que tiene una malla metálica antioxidante con un diámetro 1/8 pulgadas permitiendo (Mansilla Pérez & Ruiz Ruiz, 2009).

7.1.3. Secado

Previo al proceso de fundido para el hilado, estos fragmentos de PET deben ser secados. Dicho secado puede ser al vacío o sencillo usando un flujo de aire caliente por medio de resistencias eléctricas, generada por ventiladores con el fin de que el scrap quede libre de cualquier rastro de humedad para no afectar los procesos siguientes(Mansilla Pérez & Ruiz Ruiz, 2009).

7.1.4. *Fundido, filtrado y extrusión para hilatura*

Los procesos de hilatura de fibras artificiales pasan por tres etapas generales, la primera consiste en la preparación de una solución altamente viscosa, seguido de la extrusión de esta mezcla a través de una tobera que busca separar los componentes por acción centrífuga, por último, se emplea un agente coagulante y por acción de enfriamiento de la fibra para solidificarla poder hacer la correspondiente extrusión del PET (Pasta Hilable) (Augusto & Florencia del Rosario, 2021).

Seguido de un proceso de fundición en rangos de temperatura entre 250 °C y 260 °C, que a su vez pasa por una filtración antes de ser extruida, el proceso tiene como finalidad forzar o bombear la solución por medio de orificios de una hilera (boquilla pequeña semejante a un dedal) o tobera, continuando con un enfriamiento para endurecer mediante contacto con aire con fin de obtener un conjunto de fibras de varias hileras denominado mecha. (Augusto & Florencia del Rosario, 2021)

Estas deben cumplir con indicador llamado den este es la relación de peso y longitud del filamento, las mechas se unen para formar sub-tow (este es un grupo de mechas de 40.000 den) las cuales son depositadas en un almacenamiento (canecas), previamente dispuestas en una fileta que estas son el conjunto de 24 canecas. (Augusto & Florencia del Rosario, 2021)

7.1.5. *Estiramiento*

El sub-tow es estirado para aumentar la cristalinidad y distribución interna reduciendo el diámetro y la importancia de esta va asociada a propiedades físicas de la fibra tales como resistencia a la abrasión, elongación, adsorción de humedad y la receptividad de las fibras a los colorantes. No obstante, cabe destacar que deben estirar en caliente para que la alineación sea efectiva debido que las cadenas moleculares se mantienen por fuerzas intermoleculares de van der Waals. dando una mayor estabilidad molecular. (Augusto & Florencia del Rosario, 2021)

7.1.6. *Rizado (crimpado) y secado*

El rizado hace referencia a las ondas, quiebres, rizos o dobleces en su longitud, aumentando las propiedades de las fibras como lo son la cohesión, resiliencia, resistencia a la abrasión, elasticidad entre otros. También aumenta la absorbencia favoreciendo el confort con la piel, el proceso se realiza de forma mecánica pasando la fibra a través de rodillos grabados, aplanando

uno de sus lados, permitiendo la cohesión el cual es la capacidad de las fibras de permanecer juntas. Obtención de fibras (Mansilla Pérez & Ruiz Ruiz, 2009)

Para el proceso de hilatura después del rizado pasa por un túnel de secado para fijar el rizo en la fibra dando como resultado una mecha denominada tow quedando lista para proceso de corte dándole longitud de corte de seda entre 3 den y 15 den para la mezcla con algodón. sin embargo, el tow puede ser acondicionado para mezclas si es cortado de manera especial para este fin (unos 6 den) (Mansilla Pérez & Ruiz Ruiz, 2009)

7.1.7 Cortado y embalado

Finalmente, el tow se corta en las longitudes especificadas como se mencionó anteriormente quedando listo para ser comercializado (Gustavo & Salman, 2017).

7.2. Biodegradación del polietileno

Consiste en un proceso de 4 momentos o etapas las cuales son: Bio- deterioración también denominado el Bio-deterioro producto de la interacción entre el microorganismo y el material el cual se multiplica al interior o en la superficie del material teniendo como resultado cambios en las propiedades físicas y químicas del material, seguidamente la Bio-fragmentación donde las enzimas se fragmenta en la estructura química de los polímeros a estructuras más pequeñas como lo son oligómeros, dímeros y monómeros (Popescu et al., 2017).

Luego de esta etapa sigue la asimilación la cual es la integración de las moléculas al metabolismo del microorganismo finalmente, la mineralización la cual es la degradación completa de la molécula obteniendo productos como CO_2 N_2 CH_4 H_2O (Popescu et al., 2017).

La biodegradación depende de factores como la disponibilidad de agua, el control de temperatura, la cantidad de oxígeno, contenido de minerales, pH, potencial redox, la cantidad de carbón en la muestra y la fuente de energía. dichos parámetros permitirán el crecimiento de la bacteria o microorganismo empleado en el proceso.

La temperatura óptima para que el proceso ocurra oscila en rangos entre 0 °C y los 70 °C, presentando una mejor efectividad a temperatura promedio de 35°C. donde la velocidad de crecimiento de las bacterias presenta un porcentaje bajo de humedad relativa en la fase estacionaria mientras que los tiempos en la fase de muerte aumenta (Krishna & Tanu, 2011).

El potencial de hidrógeno óptimo oscila entre 5 y 8 permitiendo una mayor producción de biomasa, por último, el tiempo de degradación depende del espesor del polímero en condiciones ya sean aerobias o anaerobias(Beatriz, n.d.).

Por otro lado, es importante tener en cuenta las condiciones de eficiencia de degradación según el tipo de microorganismo empleado en el proceso. En la siguiente table podemos evidenciar algunos valores de eficiencia y condiciones óptimas para el método.

Tabla 2.

Eficiencia de microorganismos

Nombre	Fuente de bacteria	Eficiencia de degradación	Condiciones del microorganismo
Pseudomonas putida	Tierra de jardín	75%	T 37°C PH 6.4
Streptomyces sp	Tierra de basura	46.7%	-- PH 5.16
Brevibacillus borstelensis	--	46.2% y 29.1%	T 50 °C --
Staphylococcus sp.	Mangle	16.39 ± 0.01	T 30 °C --
Bacillus cereus	Tierra de vertedero	14%	T 37°C PH 7

Tabla 2 Eficiencia de microorganismos

Nota. La tabla muestra el tipo de microorganismos implementado para el proceso, las condiciones que requiere y la eficiencia. Tomado de Vertus, D., Ruíz, M., Henriquéz, J., & Ortíz, V. (2017). biodegradación bacteriana de polietileno y propuesta de aplicación en cerro patacón.

7.3. Pirolisis de residuos plásticos

Para la implementación de la pirolisis se deben tener en consideración algunas etapas las cuales son: el pretratamiento, en esta fase los residuos sólidos son sometidos a una operación de separación y clasificación de los diferentes tipos de plásticos. Esto es de vital importancia para la eficiencia del proceso y lo más importante el tipo de reactor a utilizar por otro lado se busca de igual forma la eliminación de contaminantes como lo son etiquetas o tapas finalmente sin triturados para reducir el tamaño de partícula (Mancheno et al., 2016).

Alimentación y calentamiento: Los residuos plásticos triturados se alimentan en un reactor o horno de pirolisis. En esta etapa, se crea un ambiente ausente de oxígeno para evitar la combustión y se aplica calor para elevar la temperatura dentro del reactor (Mancheno et al., 2016).

Descomposición térmica: Bajo altas temperaturas, los plásticos experimentan una descomposición térmica. Las grandes moléculas de polímeros se descomponen en fragmentos más pequeños, como gases, líquidos y sólidos. Este proceso se conoce como pirólisis y ocurre en ausencia de oxígeno para evitar la combustión (CARLOS & KAROLINA, 2017).

Condensación y recolección de productos: Los productos de la descomposición, como gases y vapores, se enfrían y se someten a un proceso de condensación para convertirlos en líquidos. Estos líquidos pueden incluir hidrocarburos, como metano, etileno, propileno y benceno, que son utilizables para diversos fines industriales (Álvarez-Chávez et al., 2019).

Tratamiento de productos: Los productos líquidos y sólidos obtenidos en la condensación se someten a un tratamiento adicional, como separación, purificación y refinamiento, para obtener productos de mayor calidad y utilidad (Aguado et al., 2011).

Figura 3.

Diagrama de proceso de la pirolisis

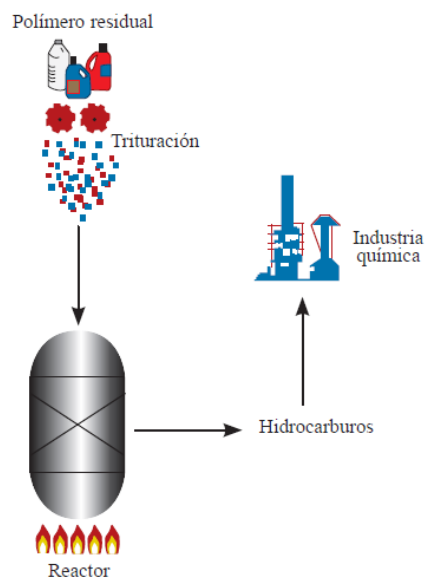


Figura 3 Diagrama de proceso de la pirolisis

Nota. La figura muestra el proceso de los procesos termolíticos de valorización de plásticos residual (Aguado et al., 2011 Química y Medio Ambiente 1. Introducción (Vol. 107, Issue 1))

La pirolisis es un procedimiento que dependerá del tipo de plástico, las condiciones del reactor, el tipo de reactor y los productos deseados dichos productos son: el aceite pirolítico, el gas de síntesis y el carbón (Anuar Sharuddin et al., 2016). En una siguiente tabla se comparó lo mencionado anteriormente obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 3.*Parámetros para le implementación de la pirolisis y los productos obtenido*

Tipo de plástico	Reactor	Parametros del proceso				producto		
		Temperatura °C	Presión	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Duración (min)	Aceite (%)	Gas (%)	Solido (%)
PET	Cama Fija	500	--	10	--	23.1	76.9	0
	--	500	1 atm	6	--	38.89	52.13	8.98
HDPE	acero horizontales	350	--	20	30	80.88	17.24	1.88
	Semi-lote	450	1 atm	25	--	91.2	4.1	4.7
PVC	Cama Fija	500	--	10	--	12.3	87.7	0
	lote de vacío	520	2Kpa	10	--	12.79	0.34	28.13
LDPE	lote presurizado	425	0,8–4,3 Mpa	10	60	89.5	1.0	0.5
	Cama fija	500	--	10	20	95	0.5	0
PP	acero horizontales	300	--	20	30	69.82	28.84	1.34
	lote	380	1 atm	3	--	80.1	6.6	13-mar
PS	Semi-lote	400	1 atm	7	--	90	6	4
	lote presurizado	425	0,31–1,6 Mpa	10	60	97	2.5	0.5

Tabla 3 Parámetros para le implementación de la pirolisis y los productos obtenido

Nota. La tabla muestras el proceso de los procesos termolíticos de valorización de plásticos residual. Tomado de (Anuar Sharuddin et al., 2016 A review on pyrolysis of plastic wastes. In Energy Conversion and Management.

7.4. Comparativa entre métodos

Una vez comprendido las técnicas de aprovechamiento de residuos plásticos se procede a comparar la viabilidad de cada método mediante el software *SuperDecisions*. Es se identifica por ser una herramienta versátil, que facilita la toma de decisiones en situaciones complejas, al permitir la evaluación de múltiples criterios frente a las alternativas ya que proporciona una base de estudio para el análisis y la comparación de opciones.

Además, el software *SuperDecisions* se basa en la teoría de la AHP (Analytic Hierarchy Process) y en la teoría de la ANP (Analytic Network Process), que son métodos analíticos para la toma de decisiones, permitiendo de esta manera estructurar y analizar problemas complejos en los que intervienen múltiples criterios y alternativas.

Inicialmente el software solicita uno o más objetivos a tener en cuenta, para nuestro caso será determinar el mejor método de aprovechamiento de residuos plásticos. Seguidamente se compara múltiples criterios para la selección del método que para el caso de estudio serán: impacto ambiental, tiempo de duración del método, la eficiencia, facilidad de implementación y el tipo de plástico empleado en el proceso finalmente el programa emplea los pasos anteriores y selecciona la alternativa más conveniente. Tal como se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 4.

Categorías

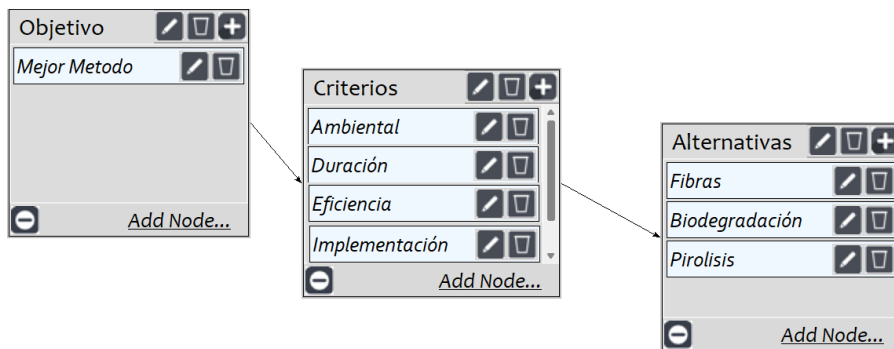


Figura 4 Categorías

Nota. La figura ilustra las 3 categorías que fueron creadas para el proceso en para el caso el objetivo el cual es definir cuál es el mejor método, los criterios para generar la comparación y las alternativas que son los métodos de aprovechamiento de residuos plásticos.

El software SuperDecisions emplea una escala cuantitativa la cual permite asignar el grado de importancia de los criterios en función de las alternativas tal como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Figura 5.

Valoración de la importancia

Intensidad de importancia	Definición
1	Igual importancia
3	Moderada importancia de uno sobre otro
5	Esencial o fuerte importancia
7	Muy fuerte importancia
9	Extrema importancia
2,4,6,8	Valores intermedios

Figura 5 Valoración de la importancia

Nota. La figura ilustra cual es el rango de valoración al momento de comprar los criterios entre las alternativas.

Comprendo lo anterior se procede a comprar y asignar manualmente la importancia de los criterios según lo analizado anteriormente para cada técnica. En primer lugar, comparamos el impacto ambiental entre las alternativas. Dando los siguientes resultados.

Figura 6.

Criterio "impacto ambiental"

Comparisons wrt "Ambiental" node in "Alternativas" cluster																				
Biodegradación is ?????? more important than Fibras																				
1. Biodegradaci~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No col
2. Biodegradaci~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No col
3. Fibras	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No col

Figura 6 Criterio "impacto ambiental"

Nota. La figura ilustra los valores seleccionados para la comparación entre las alternativas ante el criterio del impacto ambiental que genera cada método de aprovechamiento.

Nótese que la obtención de fibra a partir de PET y la pirolisis son métodos que mayor impacto ambiental presentan debido al consumo de agua y energía que están asociados a estos métodos.

En cuanto al tiempo de duración tenemos los siguientes resultados

Figura 7.

Criterio “Tiempo de duración del método”

Comparisons wrt "Duración" node in "Alternativas" cluster																				
Pirolisis is very strongly to extremely more important than Biodegradación																				
1. Biodegradaci~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No coi
2. Biodegradaci~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No coi
3. Fibras	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No coi

Figura 7 : Criterio “Tiempo de duración del método”

Nota. La figura ilustra los valores seleccionados para la comparación entre las alternativas ante el criterio tiempo de duración del método.

La comparativa concluye que el método de biodegradación requiere más tiempo para aprovechar el residuo plástico, ya que en este proceso dependerá del microorganismo empleado y las condiciones del mismo caso que no se presentan en los otros dos métodos.

Para la eficiencia se obtiene los siguientes resultados.

Figura 8.

Criterio “eficiencia”

Comparisons wrt "Eficiencia" node in "Alternativas" cluster																				
Pirolisis is moderately to strongly more important than Fibras																				
1. Biodegradaci~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No cor
2. Biodegradaci~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No cor
3. Fibras	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No cor

Figura 8 Criterio “eficiencia”

Nota. La figura ilustra los valores seleccionados para la comparación entre las alternativas ante el criterio eficiencia para cada método de aprovechamiento.

La pirolisis es el método más eficiente ya como se mostró o se evidencio a lo largo del documento los porcentajes de eficiente de este proceso se encuentra en rangos superiores al 80 % en relación a los otros dos métodos donde su eficiencia es menor al 80%

La facilidad de implementación de cada una de las técnicas fue comparada obteniendo los siguientes resultados

Figura 9.

Criterio “facilidad de implementación”

Comparisons wrt "Implementación" node in "Alternativas" cluster																				
Pirolisis is very strongly to extremely more important than Biodegradación																				
1. Biodegradaci~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No cor
2. Biodegradaci~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No cor
3. Fibras	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No cor

Figura 9 Criterio “facilidad de implementación”

Nota. La figura ilustra los valores seleccionados para la comparación entre las alternativas ante el criterio facilidad de implementación de cada método de aprovechamiento.

La biodegradación presenta dificultad en la implementación ya que se requiere equipos y condiciones de control y temperatura óptimas para llevar a cabo el proceso además se debe tener en cuenta la selección y producción de microorganismo.

Finalmente, el ultimo criterio comparado es el tipo de plástico que puede ser implementado en los procesos dando los siguientes valores.

Figura 10.

Criterio “tipo de plástico”

Comparisons wrt "Plastico" node in "Alternativas" cluster
 Pirolisis is extremely more important than Fibras

1. Biodegradaci~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No coi
2. Biodegradaci~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No coi
3. Fibras	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No coi

Figura 10 Criterio “tipo de plástico”

Nota. La figura ilustra los valores seleccionados para la comparación entre las alternativas ante el tipo de plástico que puede ser utilizado en cada método de aprovechamiento.

La pirolisis es el proceso más versátil ya que permite el uso de las 7 categorías de polímeros por ende la pirolisis puede ser implementada en diferentes tipos de industria donde se genere plásticos y aprovechar una mejor forma sus residuos.

Tabla 4.*Resultados*

	Biodegr~	Fibras	Pirolis~	Ambient~	Duración	Eficien~	Impleme~	Plastic
Biodegr~	0.00000	0.00000	0.00000	0.73064	0.06226	0.06033	0.06754	0.07180
Fibras	0.00000	0.00000	0.00000	0.08096	0.28508	0.23115	0.19907	0.11398
Pirolis~	0.00000	0.00000	0.00000	0.18839	0.65266	0.70852	0.73338	0.81421
Ambient~	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Duración	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Eficien~	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Impleme~	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Plastico	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Mejor M~	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Tabla 4 Resultados

Nota. La figura ilustra los resultados después de haber hecho la comparación de los criterios frente a las alternativas de aprovechamiento.

La pirolisis emerge como la opción más sobresaliente en comparación con la obtención de fibras a partir de PET y la biodegradación de PET, respaldada por un porcentaje de 81,4% de viabilidad, según los criterios analizados en el software SuperDecisions. Esta evaluación exhaustiva demuestra de manera concluyente que la pirolisis supera a las otras alternativas en términos de impacto ambiental, duración del método, eficiencia, facilidad de implementación y tipo de plástico utilizado. Con su capacidad para transformar los residuos plásticos en productos valiosos y reducir el impacto ambiental, la pirolisis se establece firmemente como la elección más sólida y efectiva en la búsqueda de soluciones sostenibles para el manejo de residuos plásticos.

En términos de economía circular, la pirolisis ofrece ventajas significativas al permitir la transformación de los plásticos en productos de alto valor, como combustibles y productos químicos, mientras se minimiza el impacto ambiental.

Por otro lado, la obtención de fibras a partir de PET requiere de un proceso complejo que incluye el lavado, triturado y extrusión del plástico, lo que puede generar emisiones y residuos secundarios. Mientras que la biodegradación de PET mediante microorganismos muestra una alternativa para descomponer los plásticos, aunque está en una etapa de desarrollo y requiere más investigaciones para su implementación a gran escala.

Considerando los recursos disponibles en Colombia y su creciente preocupación por el medio ambiente, la implementación de la pirolisis como método de aprovechamiento de plásticos

ofrece una oportunidad valiosa para abordar la problemática de los desechos plásticos y promover la transición hacia una economía circular y más sostenible.

Es importante destacar que se requiere un enfoque integral que involucre la educación, la regulación y la participación activa de los actores relevantes, como el sector público, privado y la sociedad civil, para impulsar la adopción y el éxito de la pirolisis como método preferido de aprovechamiento de plásticos en Colombia.

8. CONCLUSIONES

Se dio cumplimiento del objetivo general del proyecto mediante una investigación meticulosa y una revisión detallada de la literatura científica y técnica, se ha logrado trazar de manera precisa los principios esenciales y los procedimientos implicados en cada uno de estos tratamientos de residuos plásticos. La utilidad de la economía circular como enfoque conceptual ha facilitado una evaluación global de los métodos, abarcando tanto los elementos medioambientales como los económicos.

Seguidamente el primer objetivo específico se cumple al realizar una descripción meticulosa de los principios operativos de cada método ha permitido una visión más profunda de los mecanismos de transformación de los plásticos. La descripción de las etapas involucradas, las condiciones ambientales requeridas y los factores que influyen en la eficiencia ha proporcionado una base sólida para comprender cómo se pueden convertir los residuos plásticos en recursos útiles.

Por otro lado, el segundo objetivo específico se logra mediante una evaluación meticulosa de los aspectos ambientales, la eficiencia operativa y la factibilidad técnica de cada método. Permitiendo una comprensión sólida de su idoneidad en diferentes contextos. Además, la ponderación de criterios clave ha facilitado la identificación de ventajas y desafíos inherentes a cada enfoque, lo que a su vez brinda información valiosa para la toma de decisiones informadas.

Por último, el uso del software SuperDecisions ha facilitado la determinación del tratamiento más viable para los residuos plásticos en Colombia, basado en el análisis del tipo de plástico generado. Este enfoque proporciona una solución informada y respaldada por datos para abordar los desafíos específicos de gestión de residuos en el contexto colombiano.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguado, J., Serrano, D. P., María Escola, J., Briones, L., Aguado, J., Serrano, D. P., Escola, J. M., Briones, L., Rey Juan Carlos, U., & Energía, I. (2011). *Química y Medio Ambiente I. Introducción* (Vol. 107, Issue 1). www.rseq.org
- Alethia, V. M., Maribel, V. P., Rosa Ma, E. V., Marcos, M. C., Saúl, H. I., María Yolanda Leonor, O. G., & Hamilcar José, A. F. (2016). Generación, legislación y valorización de residuos plásticos en iberoamérica. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(EspecialResiduosSolidos), 63–76. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.05>
- Álvarez-Chávez, B. J., Godbout, S., Le Roux, É., Palacios, J. H., & Raghavan, V. (2019). Bio-oil yield and quality enhancement through fast pyrolysis and fractional condensation concepts. *Biofuel Research Journal*, 6(4), 1054–1064. <https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.4.2>
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. In *Energy Conversion and Management* (Vol. 115, pp. 308–326). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- Augusto, P., & Florencia del Rosario, M. (2021). *estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta de producción de frazadas a base de pet y algodón nativo*.
- Beatriz, P. (n.d.). *La degradación de los plásticos*.
- Cabello-Alvarado, C., Caicedo, C., Melo, L., & Andrade, M. L. (2019). *revisión de métodos para la obtención de textiles técnicos. textiles técnicos y su obtención*. <https://www.researchgate.net/publication/333729675>

- CARLOS, L., & KAROLINA, M. (2017). *obtención y caracterización de combustible a partir de desechos termoplásticos pebd (low density polyethylene) recolectados en la universidad de guayaquil.*
- Carolina, O. (2020). *estudio del manejo de residuos plásticos en colombia.*
- Cortes Daza, K. (2022). *importancia de las alternativas para reducir o eliminar el plástico de un solo uso en colombia importance of alternatives to reduce or remove single-use plastic in colombia.*
- Dayanna, C., Andrés, D., & Blanca, R. (2020). *The plastic and its two faces.*
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2002). *Decreto-1713-de-2002-Gestor-Normativo.*
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2015). *Decreto 1077 de 2015 Sector Vivienda, Ciudad y Territorio1.2.1.1.2.1.*
- Edward, B. (2004). *Necesitamos creatividad porque sentimos que las cosas podrían hacerse de una manera mucho más sencilla o mejor.*
- Escuela Europea Versailles. (2022).
- Europe Plastics. (2022). *Plásticos - Situación en 2022.*
- Fardy, D. (2020). *Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la universidad autónoma de occidente.*
- FOROAMBIENTAL. (2023). *El reciclado de PET en Argentina_ un negocio que termina en la basura.*

Gómez Ayala, S. L., & Yory Sanabria, F. L. (2018). Aprovechamiento de recursos renovables en la obtención de nuevos materiales. *Ingenierías USBMed*, 9(1), 69–74. <https://doi.org/10.21500/20275846.3008>

guía para plásticos. sistema de codificación. (2021). *norma técnica ntc colombiana 3205*.

guía para tratar las cuestiones ambientales en normas de producto. (2010). *guía técnica colombiana*.

Gustavo, C., & Salman, C. (2017). *estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta productora de envases de plástico termoformados rígidos pet para consumo local*.

Gutierrez, J. (2022). *Proceso de transformación digital en el eco activismo moderno*.

Ignacio, B., & Mercedes, J. (n.d.). *La Mar De Plástico*.

Ignacio, S. (2008). *Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirolisis y combustión de plásticos (PE,PVC Y PCP)*.

Krishna, M., & Tanu, S. (2011). *microbial-deterioration-and-degradation-of-polymeric-materials*.

Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., & Espinoza, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja*, 23(1). <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.06>

Mansilla Pérez, L., & Ruiz Ruiz, M. (2009). *Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster*. <http://www.plastivida.com.ar>

MARÍA, A. (2018). *Siete campañas en Colombia para reducir el uso del plástico*.

Merchán, E., & Cabrera, N. (2014). *estudio de viabilidad técnica preliminar para LA Pirolisis de residuos plásticos generados en la universidad politécnica salesiana.*

Pablo, J., & Pérez, G. (n.d.). *La industria del plástico en México y el mundo.*
<http://www.freeimages.com/browse.phtml?f=download&id=248748>

Perdomo M Fundacite-Mérida, G. A., Alberto Carnevalli, A., & Hechicera Mérida Venezuela, L. (n.d.). *Revista Iberoamericana Polímeros Volumen 3(2) Abril 2002 Perdomo Plásticos y medio ambiente PLÁSTICOS Y MEDIO AMBIENTE.*

Popescu, P. A., Popa, M. E., Mitelut, A., Tanase, E. E., Geicu-Cristea, M., & Draghici, M. (2017). *Screening of different methods to establish the biodegradability of packaging materials-a useful tool in environmental risk assessment approach* (Vol. 9).
<http://www.aes.bioflux.com.ro>

Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación Circular economy: Relationship with the evolution of the concept of sustainability and strategies for its implementation. *Memoria Investigaciones En Ingeniería*, 15.

Sangar, H. (2023). *7 Types of Plastics _ An Helpful Illustrated Guide - PlasticRanger*. Disponible en
<file:///C:/Users/STEVEN/Documents/9%20semestre/Pagos%20Pos%20Grado/parte%20%20del%20posgrado/Asignaturas/Seminario%20De%20Grado/Trabajo%20de%20grado/Referencias/Marco%20conceptual/11.html>

Sarria, R., & Gallo, J. (2016). *La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos.*

Ulloa, J. (2006). *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida.*
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047388001>

Vertus, D., Ruíz, M., Henriquéz, J., & Ortiz, V. (2017). biodegradación bacteriana de polietileno y propuesta de aplicación en cerro patacón. In *Revista de Iniciación Científica-RIC-Journal of Undergraduate Research* (Issue 1).