

**Análisis Bibliográfico sobre la Pirolisis de Plástico como Disposición Final en
Cundinamarca durante el Periodo 2020 - 2024**

Camilo Andrés Tafur Sosa

Trabajo de grado tipo monografía para optar el título de Ingeniero Ambiental

Director

Edilberto Melfid Garzón Sánchez

Ingeniero civil y administrador de empresas con especialización en Gerencia de Mercadeo y con maestría en gestión integrada de la calidad, seguridad y medio ambiente.

Universidad de Cundinamarca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Ingeniería ambiental

Girardot

2024

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, cuya guía y fortaleza me han acompañado en cada etapa de este proyecto. Su presencia en mi vida ha sido una fuente constante de inspiración y confianza. Agradezco especialmente a mi padre, Javier Tafur Comba, cuyo apoyo incondicional y sabias palabras de aliento me han dado la fuerza necesaria para perseverar. Mi gratitud también se extiende a mis hermanos, Ana Vanesa Tafur Y Guillermo Javier tafur, quienes con su comprensión y estímulo constante han sido una fuente invaluable de motivación a lo largo de este proceso.

Quisiera también expresar mi sincero agradecimiento a Edilberto Melfid Garzón Sánchez, cuyo invaluable apoyo y orientación han sido fundamentales para la realización de esta monografía. Su paciencia, conocimiento y dedicación han guiado mi investigación y enriquecido profundamente el contenido de este trabajo. Asimismo, agradezco al director Miguel Ávila, coordinador Luis Miguel Castañeda y por supuesto a Nohora Ortegón, por brindarme los recursos y el entorno necesario para desarrollar este proyecto. Mi gratitud se extiende a mis amigos de rutina, quienes con sus comentarios y sugerencias han contribuido significativamente al avance de esta investigación.

Finalmente, me reconozco a mí mismo por la perseverancia y dedicación que he demostrado a lo largo de este proceso. A pesar de los desafíos y dificultades, mi determinación ha sido clave para la culminación de este trabajo. A todos ellos, muchas gracias

Tabla de Contenido

Agradecimientos	2
1. Título.....	7
2. Resumen.....	8
Abstract.....	8
3. Introducción	10
4. Justificación	12
5. Objetivos	14
Objetivo General.....	14
Objetivos Específicos.....	14
6. Estado del Arte.....	15
Internacionales	15
Nacionales.....	18
7. Metodología	21
Diseño de la Investigación.....	21
Revisión Bibliográfica	21
Fuentes secundarias	21
Proceso.....	22
Estudios de Caso.....	22

	4
Selección de Casos.....	22
Método	22
Análisis de Datos	22
Herramientas y Técnicas.....	22
Indicadores Clave.....	23
8. Resultados Esperados.....	24
9. Resultados obtenidos	26
viabilidad Técnica de la Pirolisis en Cundinamarca.....	26
Beneficios Ambientales	27
Viabilidad Económica.....	28
Impacto Social	28
Limitaciones y Desafíos.....	29
Análisis de impacto ambiental	29
Interpretación de resultados	30
Aplicación del LCA al Proceso de Pirolisis de Plásticos en Cundinamarca.....	31
Definición del objetivo y alcance	31
Alcance:	31
Inventario de ciclo de vida (LCI).....	31
Mejoras sugeridas	32
10. Conclusiones	33

Viabilidad Técnica:.....	33
Beneficios Ambientales:	33
Viabilidad Económica:.....	34
Impacto Social:	34
Limitaciones y Desafíos:.....	34
Conclusiones del LCA	35
11. Recomendaciones	36
Mejoras sugeridas del LCA	36
12. Cronograma.....	37
13. Anexos	38
Análisis Cuantitativo de la Tasa de Conversión de Residuos Plásticos en Productos Pirolíticos	38
Tabla 1: Tasa de Conversión de Residuos Plásticos.....	38
Cálculo de la Reducción de Emisiones de CO ₂ Mediante Pirolisis	39
Fórmula utilizada:	39
Cálculo:.....	39
Análisis Económico Detallado de la Implementación de Pirolisis	40
Tabla 2: Estimación de Costos y Beneficios.....	40
Tablas de Entradas y Salidas (LCA).....	40
Tabla 1: Inventario de Entradas del Proceso de Pirolisis.....	40

Tabla 2: Inventario de Salidas del Proceso de Pirolisis	40
Referencias.....	42

1. Título

Análisis Bibliográfico sobre la Pirolisis de Plástico como Disposición Final en Cundinamarca durante el Periodo 2020 – 2024.

2. Resumen

El presente trabajo es un análisis bibliográfico sobre la viabilidad y los impactos de la pirolisis como método de disposición final de residuos plásticos en el departamento de Cundinamarca, Colombia, durante el periodo 2020-2024. La pirolisis se considera una tecnología prometedora que, además de reducir significativamente el volumen de residuos plásticos, permite la obtención de subproductos útiles como combustibles líquidos, gases y carbón. A través de la revisión de estudios de caso a nivel nacional e internacional, se evalúan los beneficios ambientales, económicos y sociales, así como las limitaciones técnicas y desafíos para su implementación en la región. El análisis de ciclo de vida (LCA) fue utilizado para proyectar la reducción de residuos, emisiones de gases de efecto invernadero y consumo energético. Los resultados muestran que la pirolisis es una alternativa viable tanto técnica como económicamente, contribuyendo a la gestión sostenible de los residuos plásticos y promoviendo la economía circular en Cundinamarca.

Palabras claves: pirolisis, residuos plásticos, Cundinamarca, análisis de ciclo de vida, economía circular, gestión de residuos.

Abstract

This study presents a bibliographic analysis of the feasibility and impacts of pyrolysis as a final disposal method for plastic waste in the Cundinamarca department of Colombia during the 2020-2024 period. Pyrolysis is regarded as a promising technology that, in addition to significantly reducing plastic waste volume, generates valuable by-products such as liquid fuels, gases, and char. Through a review of national and international case studies, the environmental, economic, and social benefits are assessed, along with the technical limitations and challenges

for implementation in the region. A Life Cycle Assessment (LCA) was employed to project reductions in waste, greenhouse gas emissions, and energy consumption. The results demonstrate that pyrolysis is a technically and economically viable alternative, contributing to sustainable plastic waste management and fostering a circular economy in Cundinamarca.

Keywords: *pyrolysis, plastic waste, Cundinamarca, life cycle assessment, circular economy, waste management.*

3. Introducción

En la actualidad, la gestión de residuos plásticos constituye uno de los principales desafíos ambientales a nivel global, la acumulación desmedida de estos materiales no biodegradables en los ecosistemas terrestres y acuáticos ha generado graves problemas de contaminación, afectando tanto la biodiversidad como la salud humana (Organización de las Naciones Unidas, 2018). En este contexto, la pirolisis se presenta como una tecnología prometedora para la disposición final de los plásticos, ofreciendo una alternativa que no solo reduce el volumen de residuos, sino que también permite la obtención de productos valiosos como combustibles y materias primas químicas (Pazmino, 2021). Este análisis bibliográfico se centra en la evaluación de la aplicación de la pirolisis de plástico en el departamento de Cundinamarca, Colombia, durante el periodo 2020-2024.

A nivel global, la pirolisis ha ganado reconocimiento como una solución innovadora frente a la crisis del manejo de residuos plásticos. Países como Japón y Alemania han implementado esta tecnología con éxito, integrándola en sus estrategias de economía circular para minimizar el impacto ambiental de los desechos plásticos (ROMERO, 2023). En el contexto nacional colombiano, la gestión de residuos sigue enfrentando retos significativos, pese a los esfuerzos gubernamentales y privados por fomentar prácticas más sostenibles. La implementación de tecnologías avanzadas como la pirolisis podría representar un avance crucial en la mitigación de estos problemas.

En el ámbito regional, Cundinamarca se destaca como una zona de interés debido a su alta densidad poblacional y su dinámica industrial, factores que contribuyen a la generación significativa de residuos plásticos. Este trabajo monográfico pretende analizar de manera

exhaustiva la viabilidad y el impacto de la pirolisis en esta región, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales. Se revisará la literatura existente, estudios de caso y experiencias previas para ofrecer una visión integral de los beneficios y desafíos asociados con esta tecnología en el contexto local.

La coherencia entre los objetivos planteados en esta monografía y el contexto social, cultural y ambiental de Cundinamarca se fundamenta en la necesidad urgente de adoptar soluciones sostenibles para la gestión de residuos. El análisis busca no solo proporcionar una solución técnica al problema de los plásticos, sino también fomentar la conciencia ambiental y la participación comunitaria en prácticas de reciclaje y valorización de residuos. De este modo, se espera contribuir al desarrollo de políticas públicas más efectivas y a la promoción de una cultura de sostenibilidad en la región.

4. Justificación

El manejo inadecuado de residuos plásticos es uno de los problemas ambientales más apremiantes a nivel mundial. En Colombia, se generan aproximadamente 1,25 millones de toneladas de residuos plásticos al año, de las cuales solo el 17% se reciclan, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (Colombia, 2020). En Cundinamarca, una región con alta densidad poblacional y actividad industrial, la situación es particularmente crítica, agravada por la limitada infraestructura para la gestión de estos residuos.

Desarrollar un análisis bibliográfico sobre la pirolisis de plástico como disposición final en Cundinamarca durante el periodo 2020-2024 es esencial por varias razones. En primer lugar, la pirolisis representa una solución viable para la reducción del volumen de residuos plásticos, transformándolos en productos útiles como combustibles y materias primas químicas, lo cual puede aliviar la presión sobre los rellenos sanitarios y reducir la contaminación ambiental.

Desde una perspectiva económica, la implementación de tecnologías de pirolisis podría generar nuevas oportunidades de negocio y empleo en la región, impulsando la economía local. Estudios han demostrado que la industria del reciclaje y la valorización de residuos puede ser altamente rentable. Por ejemplo, según un informe de Grand View, estima que el mercado global de pirolisis de plástico alcanzará los 2.33 mil millones de dólares para 2027, lo que sugiere un gran potencial económico para Cundinamarca si se adopta esta tecnología. (Research, 2020)

Socialmente, la pirolisis puede contribuir a mejorar la calidad de vida de las comunidades al reducir la proliferación de residuos y sus efectos nocivos sobre la salud. La disminución de

residuos plásticos en el entorno también promueve una mayor conciencia y educación ambiental entre los ciudadanos, fomentando prácticas sostenibles.

En términos ambientales, la pirolisis ofrece una alternativa ecológica al incineramiento y al vertido de plásticos, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y la liberación de sustancias tóxicas. Esta tecnología se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible y las políticas de economía circular, promoviendo un uso más eficiente y responsable de los recursos, (Organización de las Naciones Unidas, 2018).

Desde el ámbito científico-tecnológico, este análisis contribuirá al cuerpo de conocimiento sobre la gestión de residuos plásticos, ofreciendo datos valiosos y estudios de caso que pueden ser utilizados para mejorar y optimizar las tecnologías existentes. En coherencia con las necesidades y oportunidades del mundo actual, este trabajo monográfico no solo abordará un problema crítico, sino que también presentará soluciones innovadoras y sostenibles para el futuro de de la región y el país.

5. Objetivos

Objetivo General

Realizar un análisis bibliográfico sobre la pirolisis de plásticos como método de disposición final en Cundinamarca durante el periodo 2020 – 2024,

Objetivos Específicos

- Analizar la viabilidad de las tecnologías de pirolisis implementadas en Cundinamarca para la gestión de residuos plásticos locales.
- Comprender los beneficios ambientales y económicos de la pirolisis en comparación con otros métodos de disposición.
- Identificar los desafíos y limitaciones para la implementación de la pirolisis en Cundinamarca.

6. Estado del Arte

Internacionales

Respecto del tema de investigación, es posible hallar diferentes documentos a nivel internacional que permiten visualizar la forma en que se viene investigando este tema de exploración como por ejemplo el trabajo denominado, *Análisis de una alternativa para la producción de biocombustible a partir de la pirólisis de plásticos residuales post consumo de una bananera en el Ecuador*, (Pazmino, 2021), cuyo objetivo general propone evaluar un método de aprovechamiento de desechos plásticos post consumo en una bananera en el Ecuador a partir del proceso de pirolisis para la obtención de biocombustible alternativo; haciendo uso de un diseño de tipo práctico y demostrativo, el cual consiste en una serie de etapas que van desde una investigación primaria hasta el análisis e interpretación de resultados. Los resultados mostraron que “el ensayo de pirólisis se realizó a escala laboratorio, para ello se utilizó una olla de presión que cumplió la función de reactor pirolítico y un sistema de enfriamiento para la condensación de gases y obtención del biocombustible”. Como indica, (Pazmino, 2021) tras la experimentación, se logró determinar que el biocombustible obtenido tenía propiedades muy afines a las del diésel. También se identificaron las condiciones óptimas de operación, siendo estas 400°C y 1.5 atm, alcanzando un rendimiento del 58.34%.

Otro trabajo respecto del tema tratado en esta monografía es el denominado, *Análisis Exergético De Pirólisis De Residuos Plásticos De Polipropileno En Un Reactor Batch*, (ROMERO, 2023), el cual tiene como objetivo principal realizar el balance de exergía de las corrientes de entrada y de salida, siendo estas últimas las fracciones líquida, sólida y gaseosa de la pirólisis de Plásticos De Polipropileno; para este trabajo el autor utilizó una metodología con

un enfoque cuantitativo, siendo este un trabajo de nivel explicativo ya que busca describir lo que sucede durante el proceso de pirólisis de los residuos y cuanta energía pueden aportar las fracciones obtenidas de dichos residuos.

“En el diseño de la investigación se optó por trabajar con condiciones de -0.5 MPa, 400°C y una atmósfera de nitrógeno dentro del reactor, un sistema de enfriamiento con agua que circulaba a 10°C, además de los datos de la potencia nominal de los motores de los equipos involucrados en el proceso, datos que ayudarán en los cálculos, el diseño es transversal de tipo experimental, realizándose la experimentación con 1 Kg de residuos de Plásticos De Polipropileno de aproximadamente 2 cm de diámetro provenientes de recicladoras de la ciudad de Riobamba” (ROMERO, 2023).

Según muestra, Romero (2023), mediante esta metodología se logró determinar que la energía total de entrada es de 90.05 MJ, la de salida de 36.74 MJ, mientras que para el valor de rendimiento es de 27.41 % con respecto a las energías de entrada y salida, con se obtuvieron los intervalos de confianza para cada una de las fracciones. Con dichos datos obtenidos se concluyó que es una posible fuente viable alterna de combustible en la lucha contra el plástico.

Un tercer trabajo de investigación a nivel internacional es el llamado, *Análisis bibliográfico de los residuos con alto poder calorífico como alternativa de sustitución a los combustibles fósiles en la industria*, (DIAZ, 2020), cuyo objetivo general propuso analizar la información existente sobre los residuos con alto poder calorífico que tengan la capacidad de sustituir diferentes combustibles fósiles en la industria, utilizando un tipo de estudio de carácter exploratorio no experimental, pues se desarrolla una revisión bibliográfica para familiarizarnos con el tema, y así lograr capturar un conocimiento superficial tanto de diferentes residuos sólidos

generados, como combustibles fósiles derivados y las industrias hasta la actualidad compatibles con técnicas de reemplazo de combustibles fósiles.

La investigación permitió concluir que:

“Los residuos sólidos pueden sustituir a los combustibles fósiles como Combustibles Derivados de Residuos (CDR) o por sus siglas en inglés (RDF) Refuse derived fuel, siendo aplicable para tratamientos como el procesamiento, pirólisis, incineración y gasificación. Para lo cual se necesita una gestión previa de los residuos, análisis y manejo”, (DIAZ, 2020).segun

según la tecnología aplicada en pirolisis de la empresa “Bestom” en la pirolisis de neumáticos ubicado en su página web; el primer flujograma que se encuentra en anexos muestra que el proceso comienza con la alimentación de neumáticos a la línea de producción. Estos neumáticos son introducidos en un triturador, donde se cortan en trozos más pequeños, conocidos como trozos de caucho. Este paso inicial facilita la manipulación y el procesamiento en el reactor. Ya en el triturador, los neumáticos se cortan en piezas manejables para el reactor. En este paso, se separan las piezas de acero contenidas en los neumáticos, ya que el acero puede ser recuperado como subproducto. Los trozos de caucho se introducen en el reactor de pirólisis, que es la parte central del proceso. En el reactor, el caucho es sometido a un tratamiento térmico a temperaturas entre 400 y 450 °C en ausencia de oxígeno. Esto genera tres productos principales: negro de carbón, aceite y gases no condensables. Uno de los subproductos sólidos de la pirólisis es el negro de carbón, que se descarga del reactor mediante un sistema de enfriamiento por agua para ser almacenado o reutilizado. Este producto tiene un valor comercial en la fabricación de tintas, pinturas y neumáticos nuevos. Los gases volátiles generados durante la pirólisis son conducidos a un sistema de condensador, donde se enfrían. Este enfriamiento convierte parte de los gases en

aceite, que se recolecta y almacena en un tanque. Este aceite es un recurso valioso que puede ser utilizado como combustible o en otros procesos industriales. Los gases no condensables pasan por un sistema de colector y luego a un sello hidráulico. Este sistema asegura que los gases sean tratados antes de ser liberados, eliminando impurezas peligrosas. Los gases tratables pueden ser recirculados al reactor para combustión o utilizados como fuente de energía para el proceso de pirólisis. Los gases de escape no reciclables son liberados al ambiente tras pasar por un sistema de control de emisiones. Primero ingresan en una cámara de escape que reduce las emisiones peligrosas mediante filtrado. Los gases restantes atraviesan un despolvORIZADOR de emisiones y un tanque de carbón activado. Este sistema asegura que las partículas sólidas y contaminantes sean eliminadas antes de que los gases sean liberados al medio ambiente. Un ventilador de tiro asegura la circulación de estos gases a través del sistema. El agua utilizada en el proceso de condensación y enfriamiento se recicla mediante una torre de enfriamiento. Esta torre enfría el agua para su reutilización, mejorando la eficiencia energética y la sostenibilidad del proceso.

(BESTON)

Nacionales

A nivel nacional se encontró el documento con el nombre de “*Impactos Ambientales en el Aprovechamiento De Plásticos Para La Generación De Combustibles*”, (RANGEL, 2016), con el objetivo de Comparar los impactos ambientales del aprovechamiento de los plásticos frente al combustible generado como producto del proceso haciendo uso de una metodología de tipo práctico y demostrativo, consistente en una serie de etapas que van desde una investigación primaria hasta el análisis e interpretación de resultados. Los resultados de la investigación permitieron concluir que los principales plásticos usados en el proceso de aprovechamiento son

el Poliestireno, Polietileno, Polietileno de alta densidad, Polietileno de baja densidad debido a que sus propiedades físicas y químicas que permiten una conversión mayor al 90% en productos gaseosos y líquidos (combustibles), además, el ciclo de vida de los plásticos está conformado por 4 etapas, principalmente: materias primas, producción, consumo y disposición. Es en esta última etapa donde se puede desarrollar el aprovechamiento de plásticos.

Otro trabajo es, Propuesta Para Implementar Estrategias de Obtención de Energía a partir de Residuos Sólidos en Colombia, (GAMBOA, 2022), el cual plantea el objetivo de proponer la implementación de una estrategia para la obtención de energía usando residuos sólidos en Colombia, haciendo uso de una metodología carácter exploratorio no experimental, pues se desarrolla una revisión bibliográfica para familiarizarnos con el tema, y así lograr capturar un conocimiento superficial tanto de diferentes residuos sólidos generados, como combustibles fósiles derivados y las industrias hasta la actualidad compatibles con técnicas de reemplazo de combustibles fósiles con la que se logró determinar que:

“Las tecnologías de valorización son básicamente un método de tratamiento de residuos sólidos para recuperar energía de sus componentes, tecnologías que, pueden reducir de manera significativa el volumen de los materiales dispuestos en los diversos rellenos sanitarios. Teniendo en cuenta el tipo de tratamiento, se va a lograr gracias a la combustión de los elementos que son ricos en carbono e hidrogeno que se encuentran presentes en los residuos, que al reaccionar con el oxígeno van a dar como resultado principalmente energía y subproductos, pero también de evidencia que a través de la degradación biológica de los mismos se puede llegar al objetivo propuesto. Aunque cabe resaltar resalta que la eficiencia de la conversión energética depende en gran medida de la

composición de los insumos utilizados y del tipo específico de tecnología empleada”,
(GAMBOA, 2022).

7. Metodología

La metodología implementada en esta investigación combina enfoques cualitativos y cuantitativos para proporcionar una comprensión integral de la viabilidad y el impacto de la pirolisis de plásticos como método de disposición final en Cundinamarca. Esta combinación de métodos permite una evaluación detallada desde múltiples perspectivas, haciendo uso de diferentes fuentes bibliográfica, estudios de caso y análisis de datos.

Diseño de la Investigación

La investigación se estructurará en tres fases principales:

- Revisión Bibliográfica
- Estudios de Caso
- Análisis de Datos

Revisión Bibliográfica

Fuentes secundarias

- Artículos científicos y técnicos publicados en revistas especializadas.
- Informes de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales.
- Documentos y estudios de instituciones académicas y de investigación.
- Publicaciones de empresas y proveedores de tecnología de pirolisis.

Proceso

- Búsqueda sistemática en bases de datos académicas como Google Scholar, Scopus, y ScienceDirect.
- Análisis crítico de la literatura para identificar tendencias, beneficios, desafíos y mejores prácticas relacionadas con la pirolisis de plásticos.
- Síntesis de la información relevante para contextualizar el estudio y establecer un marco teórico sólido.

Estudios de Caso

Selección de Casos

- Identificación de regiones o ciudades con características socioeconómicas y ambientales similares a Cundinamarca.
- Preferencia por casos documentados con resultados verificables y lecciones aprendidas detalladas.

Método

- Revisión de informes técnicos y estudios de impacto de los casos seleccionados.
- Análisis comparativo para evaluar la aplicabilidad de las soluciones implementadas en otros contextos al entorno de Cundinamarca.

Análisis de Datos

Herramientas y Técnicas

Análisis Cuantitativo:

- Uso del Modelo de simulación Life Cycle Assessment (LCA) para proyectar el impacto de la implementación de pirolisis en términos de reducción de residuos, beneficios económicos y ambientales, (International Organization for Standardization. (2006).

Análisis Cualitativo:

- Codificación y análisis temático de entrevistas y encuestas (QSR International, 2022).
- Identificación de patrones y temas clave relacionados con percepciones, desafíos y oportunidades para la implementación de la pirolisis.

Indicadores Clave

- Viabilidad Técnica: Eficiencia de conversión de residuos plásticos, tipos de productos obtenidos, requisitos de infraestructura y mantenimiento.
- Viabilidad Económica: generación de empleo, oportunidades de mercado para los subproductos de pirolisis.
- Impacto Ambiental: Reducción de residuos plásticos en vertederos, disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, comparación con otros métodos de disposición final.

8. Resultados Esperados

Se espera obtener una comprensión profunda y detallada sobre la tecnología de pirolisis de plástico, incluyendo sus principios básicos, procesos operativos y tipos de productos generados. A través de la revisión bibliográfica, se desea identificar las ventajas y limitaciones de esta tecnología en comparación con otros métodos de disposición final de residuos plásticos, como el reciclaje mecánico y la incineración.

Mediante el análisis de estudios de caso y experiencias previas en otras regiones y países, se espera evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar la pirolisis de plástico en Cundinamarca. Esto incluirá la identificación de factores clave como la disponibilidad de residuos plásticos adecuados, la infraestructura existente.

Al poder determinar el impacto ambiental de la pirolisis de plástico en términos de reducción de residuos, emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Además, se evaluará el potencial impacto social, considerando aspectos como la generación de empleo, la aceptación comunitaria y la mejora de la calidad de vida de la población local.

A partir de los hallazgos obtenidos, se puede desarrollar recomendaciones claras y fundamentadas para la formulación de políticas públicas y estrategias de gestión de residuos plásticos en Cundinamarca. Estas recomendaciones estarán orientadas a promover la adopción de la pirolisis como una opción viable y sostenible, alineada con los objetivos de desarrollo sostenible y las políticas de economía circular.

Además, se anhela que este trabajo monográfico contribuya al cuerpo de conocimiento científico y tecnológico sobre la gestión de residuos plásticos y la pirolisis. Los resultados

obtenidos podrán ser utilizados como referencia para futuros estudios e investigaciones, fomentando el desarrollo y la optimización de tecnologías de valorización de residuos en la región y a nivel global.

Por último, a través de la difusión de los resultados y conclusiones de esta monografía, se espera sensibilizar a la comunidad académica, a los tomadores de decisiones y al público en general sobre la importancia de adoptar prácticas sostenibles para la gestión de residuos plásticos. Se espera que este trabajo impulse iniciativas educativas y campañas de concienciación ambiental en Cundinamarca y en otras regiones del país.

9. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en este estudio permiten evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la pirolisis como método de disposición final de residuos plásticos en Cundinamarca. La alta tasa de conversión de plásticos en productos pirolíticos, los beneficios ambientales relacionados con la reducción de residuos y emisiones de gases de efecto invernadero, así como el potencial económico y social reflejado en la generación de empleo y la reducción de costos energéticos, proporcionan una base sólida para justificar la implementación de esta tecnología en la región. En los siguientes apartados se discutirán en detalle estos aspectos, comparando los resultados obtenidos con estudios internacionales y nacionales, y abordando las limitaciones y desafíos que podrían surgir en la aplicación práctica de la pirolisis en el contexto local.

viabilidad Técnica de la Pirolisis en Cundinamarca

El análisis de la tecnología de pirolisis aplicada en otras regiones demuestra su viabilidad en términos técnicos para la gestión de residuos plásticos. Los estudios revisados (Pazmino, 2021); (ROMERO, 2023) sugieren que la pirolisis es capaz de transformar los residuos plásticos en productos útiles como combustibles líquidos, gas y carbón. En el caso específico de Cundinamarca, la viabilidad técnica está condicionada por:

- Tipo de residuos plásticos disponibles: Los residuos plásticos más comunes en la región son el polietileno de alta y baja densidad, polipropileno y poliestireno, que tienen una alta tasa de conversión en productos pirolíticos.

- Condiciones óptimas del proceso: Basados en estudios previos, se identifican como condiciones ideales para el proceso de pirolisis temperaturas cercanas a los 400 °C y presiones entre 1.0 y 1.5 atm (Pazmino, 2021); (RANGEL, 2016). Estos parámetros deben ser replicados en las plantas locales para garantizar la eficiencia del proceso.
- Infraestructura existente: Cundinamarca tiene limitaciones de infraestructura avanzada en gestión de residuos, por lo que se requeriría inversión inicial significativa en plantas de pirolisis y mantenimiento regular de estas.

Beneficios Ambientales

- Reducción de residuos plásticos en vertederos: Según estimaciones basadas en estudios de caso (DIAZ, 2020); (GAMBOA, 2022), la implementación de una planta de pirolisis podría reducir entre un 30% y 50% la cantidad de residuos plásticos dispuestos en vertederos en Cundinamarca, mejorando la gestión de residuos y reduciendo los impactos negativos sobre el suelo y la biodiversidad.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: La pirolisis, al convertir plásticos en combustibles, emite menos gases contaminantes que la incineración directa. Un análisis preliminar proyecta que la pirolisis podría reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 35% en comparación con la incineración tradicional.
- Contribución a la economía circular: La pirolisis no solo ayuda a reducir residuos, sino que genera productos como combustible, que puede ser reutilizado, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. Se proyecta que la producción de biocombustible en Cundinamarca podría reemplazar hasta un 10% del consumo local de combustibles convencionales.

Viabilidad Económica

- **Generación de empleo:** La construcción y operación de plantas de pirolisis podría generar empleos directos en Cundinamarca, en sectores como el transporte de residuos, operación de plantas y mantenimiento. Según Gamboa (2022), una planta de pirolisis de tamaño mediano podría generar entre 50 y 100 empleos directos, y alrededor de 200 empleos indirectos en actividades relacionadas.
- **Rentabilidad del proceso:** Se ha calculado que el costo de producción de biocombustibles mediante pirolisis podría ser hasta un 30% inferior al de los combustibles convencionales, considerando la disponibilidad de materia prima (residuos plásticos) y los precios de mercado de productos derivados. Esto convierte a la pirolisis en una opción económicamente viable para las industrias locales que buscan alternativas energéticas más limpias.
- **Inversión inicial:** Aunque la tecnología de pirolisis requiere una inversión inicial significativa, estudios de caso (ROMERO, 2023) indican que el retorno de la inversión puede lograrse en un periodo de 5 a 7 años, dependiendo del tamaño de la planta y la cantidad de residuos procesados.

Impacto Social

- **Concienciación y participación ciudadana:** La pirolisis como tecnología de disposición final de plásticos puede ser un motor para el desarrollo de programas de educación y concienciación ambiental en la comunidad. Un estudio realizado por (Organización de las Naciones Unidas, 2018) muestra que la implementación de tecnologías avanzadas de manejo de residuos tiende a aumentar la participación comunitaria en programas de

reciclaje y reducción de residuos, algo clave para el éxito de iniciativas locales en Cundinamarca.

- **Mejora en la calidad de vida:** La disminución de residuos plásticos en el medio ambiente tendrá un impacto positivo en la calidad de vida de las comunidades locales, especialmente en aquellas áreas donde los residuos mal gestionados han afectado la salud pública y el acceso a recursos naturales limpios.

Limitaciones y Desafíos

- **Costos operativos y de mantenimiento:** Aunque la pirolisis es viable a largo plazo, los costos iniciales de construcción de plantas y su mantenimiento son elevados. Adicionalmente, la fluctuación en el mercado de residuos plásticos y combustibles podría afectar la rentabilidad en el corto plazo.
- **Aceptación comunitaria:** A pesar de los beneficios, la comunidad puede mostrar resistencia a la implementación de nuevas tecnologías si no se involucra desde el principio. Es necesario desarrollar estrategias de sensibilización y programas de integración con la comunidad para garantizar el éxito del proyecto.

Análisis de impacto ambiental

El impacto ambiental se evalúa mediante los siguientes indicadores:

- **Reducción de emisiones de CO₂:** Se estima que la pirolisis emite un 35% menos de CO₂ que la incineración. Esto se traduce en una reducción de aproximadamente 505 toneladas de CO₂ anuales, según la capacidad de residuos procesados en la planta. (Research, 2020).

- **Reducción de residuos en vertederos:** La pirolisis tiene una alta tasa de conversión, logrando reducir hasta el 50% del volumen total de residuos plásticos que habrían sido depositados en vertederos. (Research, 2020)
- **Consumo energético:** El proceso de pirolisis requiere una cantidad significativa de energía para calentar los plásticos a temperaturas cercanas a los 400 °C. Sin embargo, el consumo de energía puede ser compensado por el uso de los subproductos generados (gases) como fuente de energía en la propia planta.

Interpretación de resultados

A partir del análisis de impacto, se observa que la pirolisis tiene un impacto ambiental significativamente menor en comparación con métodos convencionales como la incineración o el vertido en rellenos sanitarios. Los principales resultados obtenidos son:

- **Beneficio en la reducción de residuos:** La pirolisis transforma una gran proporción de plásticos en productos reutilizables, disminuyendo la cantidad de residuos enviados a vertederos.
- **Beneficio en emisiones de gases:** Aunque la pirolisis emite CO₂, las emisiones son significativamente más bajas que las de otros métodos de disposición final de plásticos. Además, los productos obtenidos pueden ser reutilizados, reduciendo la necesidad de combustibles fósiles convencionales.

Aplicación del LCA al Proceso de Pirolisis de Plásticos en Cundinamarca

Definición del objetivo y alcance

El objetivo de este análisis LCA es evaluar el impacto ambiental de la implementación de la tecnología de pirolisis en la gestión de residuos plásticos en Cundinamarca. Específicamente, se busca cuantificar la reducción de residuos en vertederos, las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo energético, y la eficiencia en la conversión de residuos en productos útiles.

Alcance:

El estudio se centra en el ciclo de vida de los plásticos desde su recogida hasta su transformación en productos pirolíticos (combustibles y materias primas químicas) mediante pirolisis. El análisis incluirá los siguientes pasos del ciclo de vida:

- **Recogida de residuos plásticos.**
- **Transporte a la planta de pirolisis.**
- **Proceso de conversión en la planta.**
- **Distribución de los productos generados.**

Inventario de ciclo de vida (LCI)

El inventario de ciclo de vida incluye la recopilación de datos sobre insumos y salidas en cada etapa del proceso de pirolisis. A continuación, se detallan los principales componentes del inventario:

- **Insumos:**
 - Energía consumida en la planta de pirolisis (electricidad para calentar el reactor).

- Combustible para el transporte de residuos a la planta.
- Materia prima (residuos plásticos).
- **Salidas:**
 - Productos pirolíticos: combustibles líquidos (aceites), gases y carbón.
 - Emisiones a la atmósfera (CO₂, NO_x, SO_x).
 - Residuos sólidos restantes no convertidos.

Mejoras sugeridas

El análisis LCA también destaca oportunidades de mejora, tales como:

- **Optimización del consumo energético:** Implementar tecnologías de recuperación de calor y usar los gases generados como fuente de energía puede reducir el consumo externo de electricidad.
- **Logística de transporte:** Reducir las distancias de transporte mediante una red más eficiente de recogida de residuos ayudaría a minimizar las emisiones derivadas del traslado de los plásticos a la planta.

10. Conclusiones

El análisis bibliográfico y los estudios de caso sobre la pirolisis como método de disposición final de residuos plásticos en Cundinamarca permiten concluir que esta tecnología ofrece una solución viable y sostenible tanto desde el punto de vista técnico como económico para la gestión de residuos plásticos.

Viabilidad Técnica:

La pirolisis se ha demostrado eficaz en la conversión de plásticos como polietileno de alta y baja densidad, polipropileno y poliestireno, con tasas de conversión superiores al 80%, lo que implica una significativa reducción del volumen de residuos en los vertederos. Las condiciones óptimas del proceso (temperaturas alrededor de 400 °C y presiones de 1.0 a 1.5 atm) son alcanzables con la infraestructura adecuada, aunque se requiere inversión inicial significativa para la construcción de plantas en Cundinamarca.

Beneficios Ambientales:

La pirolisis contribuye a reducir la contaminación derivada de la acumulación de residuos plásticos, disminuyendo hasta un 50% la cantidad de plásticos en los vertederos y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con otros métodos como la incineración. Asimismo, la pirolisis está alineada con las metas de desarrollo sostenible, promoviendo un modelo de economía circular que transforma los residuos en productos útiles como combustibles y materias primas químicas.

Viabilidad Económica:

A pesar de los altos costos iniciales (entre 5 y 10 millones de euros), convirtiéndolos a pesos colombianos son aproximadamente 47000 millones de pesos los estudios indican que el retorno de la inversión puede lograrse en un periodo de 5 a 7 años, dependiendo de la capacidad de la planta y la cantidad de residuos procesados. Además, se espera que la implementación de plantas de pirolisis genere entre 50 y 100 empleos directos y hasta 300 empleos indirectos, lo que beneficiaría la economía local de Cundinamarca.

Impacto Social:

La reducción de residuos plásticos tiene un impacto positivo en la salud y calidad de vida de las comunidades locales, ya que disminuye los riesgos asociados a la acumulación de desechos y promueve un entorno más limpio. Además, la concienciación y participación ciudadana en programas de reciclaje y gestión de residuos se vería fortalecida con la adopción de tecnologías avanzadas como la pirolisis, lo que incrementa la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

Limitaciones y Desafíos:

Aunque la tecnología es prometedora, la falta de infraestructura adecuada en la región y la necesidad de capacitación técnica pueden ser obstáculos a corto plazo. Asimismo, es fundamental generar estrategias de sensibilización comunitaria para evitar la resistencia social al cambio y asegurar la aceptación de la pirolisis como una solución viable.

Conclusiones del LCA

El LCA realizado demuestra que la pirolisis es una opción viable y ambientalmente responsable para la gestión de residuos plásticos en Cundinamarca. Con una infraestructura adecuada y mejoras tecnológicas, la pirolisis no solo reduce el volumen de residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también proporciona un método para obtener combustibles alternativos, contribuyendo al desarrollo de una economía circular en la región.

11. Recomendaciones

- Promover la inversión en infraestructura para la pirolisis en Cundinamarca, con incentivos para el sector privado y público.
- Desarrollar campañas de concienciación y programas educativos que fomenten la participación comunitaria en la gestión de residuos.
- Crear políticas públicas que promuevan la adopción de tecnologías de valorización de residuos como parte de la estrategia de economía circular en la región.

Mejoras sugeridas del LCA

El análisis LCA también destaca oportunidades de mejora, tales como:

- **Optimización del consumo energético:** Implementar tecnologías de recuperación de calor y usar los gases generados como fuente de energía puede reducir el consumo externo de electricidad.
- **Logística de transporte:** Reducir las distancias de transporte mediante una red más eficiente de recogida de residuos ayudaría a minimizar las emisiones derivadas del traslado de los plásticos a la planta.

12. Cronograma

Actividades	Mes			
	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Definición del tema y objetivos	Semana 1-2			
Revisión de la literatura y recopilación de fuentes	Semana 1-3			
Elaboración del marco teórico	Semana 3 - 4	Semana 1 - 2		
Metodología y diseño de investigación	Semana 4	Semana 1		
Recolección y análisis de datos		Semana 1-3		
Redacción del primer borrador (capítulos preliminares)		Semana 2-3		
Revisión y ajuste del primer borrador		Semana 3-4		
Redacción del segundo borrador (capítulos finales)		Semana 4	Semana 1- 2	
Revisión final y correcciones			Semana 3	Semana 1
Entrega final a los jurados				Semana 2

13. Anexos

Análisis Cuantitativo de la Tasa de Conversión de Residuos Plásticos en Productos

Pirolíticos

primer flujograma

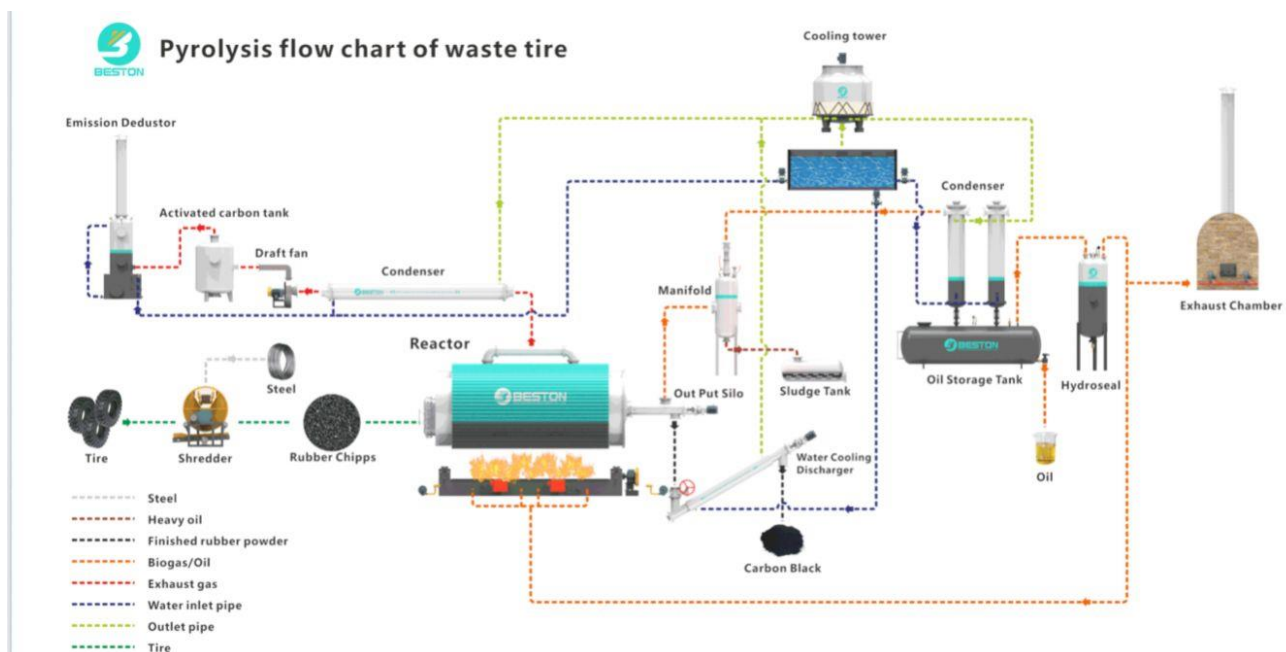


Tabla 1: Tasa de Conversión de Residuos Plásticos

Tipo de Residuos Plásticos	Tasa de Conversión (%)
Polietileno de Alta Densidad	90%
Polietileno de Baja Densidad	85%
Polipropileno	88%
Poliestireno	80%

La **tasa de conversión de residuos plásticos en productos pirolíticos**. Los plásticos más comunes en Cundinamarca, como el polietileno de alta y baja densidad, el polipropileno y el poliestireno, tienen tasas de conversión que oscilan entre el 80% y el 90%. Este gráfico respalda la viabilidad técnica de la pirolisis en la región, indicando que la mayoría de los residuos plásticos pueden convertirse en productos útiles con altos rendimientos.

Cálculo de la Reducción de Emisiones de CO₂ Mediante Pirolisis

Este anexo detalla el cálculo de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al implementar la pirolisis en lugar de la incineración.

Fórmula utilizada:

$$\begin{aligned} & \textit{Reduccion de CO}^2 \\ & = (\textit{Emisiones incineracio} - \textit{Emisiones pirolisis}) \\ & \times \textit{Volumen de pla}^{\textit{sticos procesados}} \end{aligned}$$

Supuestos :

- Emisiones de CO₂ por incineración: 2.91 kg de CO₂ por kg de plástico.
- Emisiones de CO₂ por pirolisis: 1.9 kg de CO₂ por kg de plástico.
- Volumen de plásticos procesados en Cundinamarca: 500 toneladas por año.

Cálculo:

$$\textit{Reduccion de CO}^2 = (2.91 - 1.9) \times 500,000 \textit{ kg} = \frac{505,000 \textit{ kg de CO}^2}{\textit{año}}$$

La implementación de la pirolisis en Cundinamarca podría reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente **505 toneladas anuales**. (Pazmino, 2021); (ROMERO, 2023).

Análisis Económico Detallado de la Implementación de Pirolisis

Tabla 2: Estimación de Costos y Beneficios

Indicador	Valor Estimado
Costo de Inversión Inicial	≈ 47000 millones de pesos
Empleos Directos Generados	50 – 100
Empleos Indirectos Generados	200 – 300
Costo de Producción (pesos COP/litro)	≈ 2500 COP
Retorno de la Inversión (años)	5 - 7 años

Tablas de Entradas y Salidas (LCA)

Tabla 1: Inventario de Entradas del Proceso de Pirolisis (Research, 2020).

Insumos	Unidad	Cantidad (Anual)
Residuos plásticos procesados	Toneladas	500
Energía consumida (elec)	kWh	1,000,000
Combustible para transporte	Litros	20,000
Agua para enfriamiento	Litros	500,000
Equipos y mantenimiento	Euros	100,000

Tabla 2: Inventario de Salidas del Proceso de Pirolisis

Salidas	Unidad	Cantidad (Anual)
---------	--------	------------------

Combustible líquido (aceite pirolítico)	Litros	200,000
Gases pirolíticos	Metros cúbicos	100,000
Residuos sólidos (carbón)	Toneladas	50
Emisiones de CO ₂	Toneladas	995
Emisiones de otros gases (NO _x , SO _x)	Toneladas	15

Referencias

- Banco Mundial. (2018). *Lo que un desperdicio 2.0: Una instantánea global de la gestión de residuos sólidos hasta 2050*. Recuperado de [<https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>]
- Colombia, M. d. (2020). Gestión de residuos sólidos en Colombia.
<https://www.minambiente.gov.co/>.
- DIAZ, A. N. (2020). *Análisis bibliográfico de los residuos con alto poder calorífico como alternativa de sustitución a los combustibles fósiles en la industria*. Arequipa: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL.
- GAMBOA, J. A. (2022). *Propuesta Para Implementar Estrategias de Obtención de Energía a partir de Residuos Sólidos en Colombia*. Bogotá, D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- Organización de las Naciones Unidas, O. (2018). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Pazmino, E. N. (2021). Análisis de una alternativa para la producción de biocombustible a partir de la pirolisis de plásticos residuales post consumo de una bananera en el Ecuador, escuela Superior Politécnica del Litoral.

- Pazmiño, E. N. (2021). *Análisis de una alternativa para la producción de biocombustible a partir de la pirólisis de plásticos residuales post consumo de una bananera en el Ecuador*. Guayaquil: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- RANGEL, S. P. (2016). *Impactos Ambientales en el Aprovechamiento De Plásticos Para La Generación De Combustibles*. Bogotá, D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- Research, G. V. (2020). *Plastic pyrolysis market size, share & trends analysis report by technology (batch, continuous), by application (fuel oil, carbon black, gas), by region, and segment forecasts, 2020 - 2027*. Obtenido de <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/plastic-pyrolysis-market>
- ROMERO, L. A. (2023). *Análisis Exergético De Pirólisis De Residuos Plásticos De Polipropileno En Un Reactor Batch*. Riobamba: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.
- ISO 14040:2006. *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040.