



ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL APROVECHAMIENTO DE NEUMÁTICOS
FUERA DE USO (NFU) Y SUS SUBPRODUCTOS EN LA CIUDAD DE
BARRANQUILLA

Autor:

Jefry Joorgao Bernal Cáceres

Corporación Universitaria Reformada

Facultad de ingeniería

Programa de Tecnología en Desarrollo Ambiental y Sostenible Articulado por ciclo
propedeútico con Ingeniería Ambiental.

Barranquilla- Atlántico

2025



ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL APROVECHAMIENTO DE NEUMÁTICOS
FUERA DE USO (NFU) Y SUS SUBPRODUCTOS EN LA CIUDAD DE
BARRANQUILLA

Autor:

Jefry Joorgao Bernal Cáceres

Investigación presentada como requisito para otorgar por el título de Tecnólogo en Desarrollo
Ambiental y Sostenible.

Tutor: Ing. Juan pablo Acevedo

Corporación universitaria reformada

Departamento de Ingeniería

Barranquilla- Atlántico

2025

CONTENIDO

Resumen.....	
Abstract.....	
1. Introducción	
2. Planteamiento del problema	
3. Justificación,,,.....	
4. Objetivos	
4.1 Objetivo general.....	
4.2 Objetivos específicos.....	
5. Marco referencial	
5.1 Marco teórico	
5.2 Marco Legal.....	
5.3 Estado del arte	
6. Metodología.....	
7. Resultado Y Discusión.....	
8. Conclusiones y Recomendaciones.....	
9. Referencias Bibliográficas.....	

RESÚMEN

El propósito de este estudio es analizar la viabilidad económica y técnica de emplear neumáticos en Barranquilla, Colombia, centrada en su conversión a subproductos reciclables a través de procesos tecnológicos sencillos. La metodología comprende la identificación de productos secundarios, el análisis del proceso productivo, estimaciones de los ingresos y una investigación sobre los efectos de la quema ilícita, aparte de prever costos operativos. Los hallazgos apuntan que el proyecto, en condiciones semiartesanales tiene una relación costo-beneficio positiva, brindando importantes ventajas ambientales al disminuir la acumulación y las quemas ilegales, así como las emisiones lo que concuerda con la administración integral de los residuos sólidos y con la economía circular.

Palabras claves: Factibilidad, Neumáticos, Proceso productivo, costos, Gestión integral de residuos sólidos y economía circular

ABSTRACT

The purpose of this study is to assess the economic and technical feasibility of using tires in Barranquilla, Colombia, focusing on their conversion into recyclable by-products through simple technological processes. The methodology includes the identification of secondary products, analysis of the production process, revenue estimates, and research on the effects of illegal burning, in addition to forecasting operating costs. The findings indicate that the project, under semi-artisanal conditions, has a positive cost-benefit ratio, providing significant environmental advantages by reducing accumulation and illegal burning, as well as emissions, which is consistent with integrated solid waste management and the circular economy.

Keywords: Feasibility, Tires, Production process, Costs, Integrated solid waste management, Circular economy

Introducción

En la actualidad, en lo que concierne a la gestión ambiental urbana, algunos residuos representan retos específicos por su complicada composición química que los hace contaminantes y no biodegradables por su gran durabilidad y porque se producen en grandes cantidades, lo que aumenta el volumen en vertederos y costos medioambientales y económicos. Entre estos, los neumáticos fuera de uso (NFU) son uno de los flujos más difíciles debido a su estructura fisicoquímica que se degrada lentamente; en ciudades como Barranquilla, el aumento del número de vehículos ha hecho que su producción sea mayor, lo que pone de manifiesto las carencias en los sistemas para recogerlos, utilizarlos y deshacerse de ellos (Jaime Hidalgo, 2018). La disposición inadecuada de NFU genera múltiples impactos ambientales y sanitarios. La acumulación de llantas favorece la proliferación de vectores como *Aedes aegypti*, asociado a enfermedades como dengue, zika y chikungunya. Adicionalmente, la degradación progresiva del material puede liberar compuestos potencialmente peligrosos, mientras que la quema ilegal produce emisiones atmosféricas altamente contaminantes, incluyendo material particulado fino (PM_{2.5}), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), dioxinas y furanos, con efectos adversos sobre la calidad del aire y la salud pública.

Desde la perspectiva de la ingeniería ambiental, la gestión de residuos difíciles de descomponer, como los neumáticos fuera de uso, es crucial para la reconsideración de ciclos productivos sostenibles. Implica evaluar atributos como la resistencia al desgaste, propiedades térmicas y físicas, y el potencial de reciclaje. Estos residuos no solo obstruyen los rellenos sanitarios, que ocupan diez veces más volumen que la basura ordinaria, sino que también infringen los lineamientos de gestión integral de residuos sólidos cuando se disponen inadecuadamente en vertederos. (Vásquez, 2021).

Frente a esta situación, la economía circular se establece como una perspectiva estratégica que promueve terminar ciclos de materiales al convertir los desechos en recursos para la producción. La transformación de los NFU en subproductos como asfalto modificado, caucho granulado y acero recuperado proporciona una respuesta técnica y ambientalmente factible, ya que disminuye el impacto, produce valor económico y fortalece los mercados de materiales reciclados. (Vásquez, 2021).

El reciclaje de neumáticos semiartesanal en Colombia promueve comunidades organizadas, reduce la contaminación y fortalece la colaboración entre universidades, talleres mecánicos y recolectores informales. En Barranquilla, la iniciativa es crítica ante el aumento de vehículos y la falta de gestión especializada, posicionando a la ingeniería ambiental como un motor de sostenibilidad urbana (Bohórquez & Ballesteros, 2016)

La presente investigación examina tecnologías que logran disminuir en un 95% la incineración de neumáticos ilegales, convirtiendo residuos en recursos industriales alineado todo esto con los ODS 11 y 12 y con la Ley 1672/2013 sobre responsabilidad del fabricante.

Planteamiento del problema

La producción cada vez mayor de neumáticos fuera de uso (NFU) supone un importante reto medioambiental a escala global, nacional y local. Esto se debe a su compleja composición y a que no son biodegradables, lo cual requiere sistemas de gestión especializados. La calidad del aire, la del suelo y la salud pública se deterioran en contextos urbanos como Barranquilla debido a la escasa infraestructura para su uso y a prácticas inapropiadas, como quemar de forma ilegal y amontonar en espacios públicos. (Jaime Hidalgo, 2018)

En Barranquilla, la administración de estos residuos afronta desafíos importantes, como la escasez de infraestructura para su reciclaje y disposición final, lo que provoca que se acumulen en espacios públicos. La quema de llantas, a pesar de ser ilegal, sigue causando daños a la salud y al medio ambiente. La producción en aumento de neumáticos desechados, Lópa causa del incremento de vehículos en circulación, genera inquietudes económicas y medioambientales, ya que provoca contaminación del agua, el aire y la tierra, sobre todo por quemas ilegales. A pesar de que existen opciones de reciclaje como la trituración para emplear en el pavimentado de calles con asfalto modificado (que es más duradero y menos perjudicial para el medioambiente que el asfalto convencional), no se utilizan adecuadamente muchas de ellas.

Debido a que la infraestructura para procesar neumáticos usados es insuficiente, se complica la tarea de transformar estos desechos en productos útiles como acero y caucho molido. Es necesario un estudio técnico-económico que examine su factibilidad en el sector industrial del país, estableciendo la eficiencia, rentabilidad, calidad y potencial de estos subproductos. Este complicado problema necesita soluciones coordinadas y rápidas a nivel local, nacional e internacional, que fomenten la economía circular, leyes más rigurosas, regulaciones semejantes a las de América Latina y la Unión Europea (centrándose en alianzas entre el sector público y el privado e incluyendo un 5% de material reciclado en obras civiles),

campañas para concienciar a la comunidad, reforzamiento de proyectos de reciclaje, educación ambiental y un control más estricto para desalentar la quema ilegal.

¿Qué tan factible es la valorización material de los neumáticos fuera de uso (NFU) en Barranquilla desde el punto de vista técnico y económico?

JUSTIFICACIÓN

En Colombia, el aumento constante del parque automotor ha llevado a una demanda más alta de llantas, lo que a su vez ha generado un mayor número de neumáticos fuera de uso (NFU). A pesar de los marcos normativos de responsabilidad ampliada del productor, que muestran deficiencias en la utilización efectiva, sobre todo en ciudades intermedias y portuarias como Barranquilla, estos residuos presentan retos cruciales para el manejo ambiental debido a su larga persistencia y a las repercusiones que surgen de su disposición inadecuada. (Álvarez & López, 2023).

El análisis propuesto justifica la necesidad de abordar el problema de las llantas desechadas desde una perspectiva ambiental y económica. Este proyecto busca minimizar la contaminación visual en Barranquilla y mejorar la gestión de residuos, con un enfoque en reducir la contaminación y promover el desarrollo sostenible. Además, busca disminuir la proliferación de *Aedes aegypti*, el mosquito del dengue, y otros problemas relacionados que afectan a la población local. El impacto ambiental de las llantas, compuestas por materiales de difícil descomposición, contribuye a la contaminación cuando su gestión es inadecuada. Los desafíos industriales incluyen la falta de métodos eficientes para su reciclaje, lo que incrementa los costos operativos. Sin embargo, promover la economía circular mediante la reutilización de llantas usadas para la creación de productos como selladores de techos puede transformar este problema en una oportunidad. Este modelo reduciría residuos, ofrecería una alternativa económica y beneficios ambientales al disminuir la demanda de nuevos materiales y la contaminación. Además, fomentaría la generación de empleo en el sector de reciclaje y ofrecería soluciones accesibles a comunidades vulnerables, alineándose con estrategias globales de mitigación del cambio climático. La creciente generación de llantas desechadas destaca la necesidad urgente de soluciones sostenibles que aporten valor económico y mitiguen su impacto ecológico.

Este proyecto analiza las posibilidades técnicas y económicas del aprovechamiento de subproductos, específicamente llantas fuera de uso, para fomentar una economía circular, reducir el impacto ambiental y promover oportunidades de negocio y tecnología. La investigación busca informar decisiones sobre políticas públicas, inversión y desarrollo sostenible en Colombia, donde persisten desafíos en la gestión de estos residuos.

En respuesta a la problemática de manejo de llantas usadas, Colombia emitió la Resolución No. 1457 de 2010, reemplazada por la Resolución No. 1326 en 2017, que obliga a los comercializadores a implementar un sistema de recolección y gestión ambiental. Sin embargo, la mera existencia de esta normativa no ha resuelto el problema, evidenciado por la acumulación y quema de llantas en el país. Colombia, comprometida con acuerdos ambientales internacionales desde el siglo XX, reconoce en su Constitución el derecho a un ambiente sano y la obligación del Estado de manejar los recursos naturales de forma sostenible y controlar el deterioro ambiental. (Álvarez Álvarez & López, 2023).

Desde la perspectiva de la ingeniería ambiental, resulta fundamental evaluar alternativas tecnológicas y modelos de negocio que permitan transformar esta problemática en oportunidades de valorización material, reducción de impactos ambientales y generación de beneficios socioeconómicos locales. Estas estrategias, además de mejorar el cierre de ciclos en la economía circular, promueven el empleo verde, la creación de cadenas de valor sostenibles y la reducción de riesgos sanitarios en áreas urbanas como Barranquilla.

Asimismo, fomentan la innovación tecnológica local a través de asociaciones entre el sector público y el privado, y aumentan la capacidad de resistencia medioambiental al disminuir la dependencia de los vertederos y reducir las emisiones contaminantes relacionadas con prácticas ilegales de eliminación.

OBJETIVO GENERAL

Establecer la viabilidad técnica, económica y normativa del reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU) con el objetivo de producir subproductos como selladores impermeabilizantes y asfalto ecológico, a través del análisis documental, evaluando su capacidad para generar valor, rentabilidad y aporte al empleo verde local.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Examinar procedimientos documentados para el tratamiento de NFU, donde se analizan variables con el objetivo de determinar alternativas viables para obtener materiales homogéneos sin optimización experimental directa.
2. Evaluar la durabilidad, eficacia y rendimiento de subproductos de NFU en aplicaciones reales, comparándolos con materiales convencionales, para determinar su competitividad en la reparación de baches o sellado.
3. Determinar el potencial económico de los subproductos de la NFU en los sectores industriales, mediante un modelo financiero hipotético-teórico junto con estrategias de adopción sostenible mediante la colaboración con talleres, empresas de reciclaje y entidades gubernamentales, con el respaldo de los marcos normativos y los programas de recogida existentes.

MARCO TEÓRICO

El neumático, compuesto de 70% de caucho y 15% de textiles y acero, es esencial para el contacto entre la carretera y el automóvil. Es crucial para la adherencia, el roce, la transmisión de fuerza y la absorción de irregularidades en la carretera, así como para la seguridad al permitir un frenado efectivo y estabilidad direccional. Sus partes incluyen la banda de rodadura, hombro, flanco, talón rígido y capas textiles/acero. Existen variantes de neumáticos para verano, invierno y todo tiempo que proporcionan comodidad, tracción y protección. (Sánchez & Guzmán, 2018)

Los neumáticos usados (NFU) son considerados desechos peligrosos no biodegradables que, si se eliminan de manera inadecuada, generan contaminación y emisiones nocivas, lo cual es un problema significativo en Barranquilla. Sin embargo, su reciclaje a través de trituración permite obtener caucho granulado, acero recuperado y otros subproductos, contribuyendo a la sostenibilidad y a la economía circular mediante las 3R (reducir, reutilizar y reciclar). (Sánchez & Guzmán, 2018)

También cuenta con una combinación de diversos componentes que le posibilitan resistir temperaturas elevadas y bajas, sequedad extrema y humedad, estar expuesto al oxígeno, soportar cargas excesivamente pesadas, combustibles, aceites, luz solar y ser seguras y deformarse lo menos posible. Cuando conseguimos estas propiedades, tenemos un producto cuya degradación es difícil y su manejo es complejo desde el punto de vista ambiental. (Bohórquez & Ballesteros, 2016).

Los neumáticos tienen un ciclo de vida que requiere el uso de diversas materias primas e insumos. En todas las etapas de ese ciclo, se generan residuos, desechos o subproductos que tienen la capacidad de afectar negativamente al medio ambiente. El ciclo vital de las llantas solo incluye a los proveedores y fabricantes de materias primas. Sin embargo, como

ciudadanos que respetan el medio ambiente, tenemos la obligación de influir de forma positiva durante las dos últimas etapas de este ciclo. (Bohórquez & Ballesteros, 2016).

Para dar claridad a lo relacionado con la composición de los neumáticos y su impacto ambiental a continuación la tabla 1 lo muestra

Tabla 1

Neumáticos, su función e impacto ambiental.

Aspecto	Función	Impacto Ambiental
Composición	Parte lateral, talón rígido, hombro, banda de rodadura y capas de acero/textiles; 15% de textiles/acero, 70% de goma. (Cantillo, Giraldo & Moreno, 2011)	Desechos dañinos que no son biodegradables; resistencia alta a la radiación solar, a cargas pesadas, a temperaturas y oxígeno. (Cantillo, Giraldo & Moreno, 2011)
Funciones Principales	Interacción entre el vehículo y la carretera; fricción, transmisión de fuerza, absorción de imperfecciones, frenado eficaz, estabilidad en la dirección. (Álvarez Álvarez & López, 2023).	En Barranquilla, problema serio es la contaminación que resulta de la eliminación inadecuada (de emisiones de quema ilegal y metales pesados). (Álvarez Álvarez & López, 2023).
Tipos y Propiedades	Invierno, verano, cualquier estación; protección, confort, agarre	El ciclo de vida genera residuos en cada etapa; desde los proveedores hasta el final, tiene un efecto en el medio ambiente.
Gestión Sostenible	N/A	Reciclaje por trituración → acero recuperado, caucho granulado; economía circular a través de las 3R (reducir, reutilizar y reciclar). (Cardona, 2016)
Responsabilidad	N/A	Los ciudadanos deben tener un impacto positivo en las etapas finales del ciclo de vida. (Rodríguez Rivero & Leguía Zambrano, 2017)

Nota: Fuente: Elaboración propia

La gestión integral de residuos sólidos se fundamenta en el Triángulo de la Ecología, donde la economía circular y los principios de reducir, reutilizar y reciclar se interrelacionan para

minimizar el impacto ambiental desde el inicio. Estas ideas están diseñadas para optimizar la gestión de residuos, promoviendo el consumo reducido y la reutilización de materiales, lo que resulta en una mayor eficiencia económica y energética. En el ámbito de la ingeniería ambiental, este enfoque transforma los flujos lineales de "extraer, producir, desechar" en ciclos cerrados que ayudan a conservar recursos y disminuir la huella ecológica. La aplicación de la economía circular define tres estrategias clave: Disminuir, que optimiza el diseño de productos para reducir desechos desde su creación; reutilizar, que extiende la vida útil a través de remanufactura e innovación; y reciclar, que convierte residuos en materias primas secundarias. En contextos urbanos como Barranquilla, desarrollar sistemas de gestión integrada de residuos sólidos (GIRS) que incorporen la responsabilidad extendida del productor es esencial para mitigar prácticas contaminantes, como la quema ilegal de neumáticos, y mantener un orden jerárquico efectivo en la gestión de residuos. (González & David, 2008)

Figura 1

Triángulo jerárquico de las 3 R



Nota: Fuente: Elaboración propia.

- **REDUCIR.** La primera «R» del triángulo ecológico enfatiza el consumo consciente y respetuoso con el medio ambiente en contraposición al consumismo actual. Este

enfoque aborda la sobreexplotación de recursos naturales impulsada por la publicidad, que incrementa la contaminación y afecta la calidad de vida. Reducir el consumo implica decisiones informadas que consideren los costos medioambientales y económicos, favoreciendo el uso eficiente de recursos como el automóvil, la energía y el agua. En un escenario ideal, esto permitiría establecer un equilibrio sin depender excesivamente del reciclaje, que ha desplazado a la reducción de consumo como prioridad ecológica. La educación ambiental es fundamental para fomentar hábitos de consumo responsables y entender los beneficios económicos de reducir el consumo (González & David, 2008)

- REUTILIZAR, la segunda "R" en la jerarquía de las 3R, es fundamental para extender la vida útil de productos ya adquiridos mediante creatividad y rediseño. Esta práctica, que se sitúa entre la reducción del consumo y el reciclaje, es más compleja que la reducción, ya que requiere conciencia, decisión y capacidades prácticas para dar nuevos usos a objetos. Ejemplos incluyen transformar neumáticos usados en calefacción y convertir recipientes plásticos en macetas. Se necesita asesoría técnica para implementar estos métodos eficazmente, subrayando la importancia de capacitar a los ciudadanos en los principios y procesos de la reutilización. Esto fomenta una economía sostenible basada en la durabilidad y multifuncionalidad de productos, contribuyendo a la reducción de residuos y asegurando que el reciclaje sea la última opción en la jerarquía ecológica. (González & David, 2008)
- RECICLAR, La tercera "R" del reciclaje implica transformar materiales desechados en nuevas materias primas, pero solo cuando la reducción y reutilización no son viables. Según Lara González, no todos los materiales son reciclables debido a requerimientos específicos, consumo energético y conocimientos especializados, resultando en productos reciclados de menor calidad. El reciclaje también tiene un número limitado

de ciclos efectivos, lo que hace crucial informar al consumidor sobre estas limitaciones para evitar percepciones erróneas. Es fundamental relegar el reciclaje a una opción final en la jerarquía de gestión de residuos y fomentar un conocimiento ecológico profundo. Se recomienda educar a los consumidores sobre la elección de productos más reciclables y ser conscientes de los costos logísticos y energéticos del reciclaje, utilizándolo solo después de agotar las opciones de reducción y reutilización. (González & David, 2008)

De lo dicho anteriormente, la tabla 2 sintetiza para mejor comprensión el triángulo ecológico.

Tabla 2

Resumen “3R”

Principio	Concepto	Características	Ejemplos	Jerarquía
REDUCIR (1ª R - Prioridad Máxima)	Reducir la explotación de los recursos desde su comienzo; un consumo consciente en oposición al consumismo patológico.	Tomar decisiones considerando los costos ambientales y económicos utilizar el automóvil, la energía y el agua de forma eficaz; evitar que las materias primas se terminen.	Emplear los vehículos de forma correcta, hacer un uso consciente del agua y consumir la energía necesaria en el hogar o en el trabajo.	El escenario ideal suprime la necesidad de reciclar o reutilizar, ya que es sustituido por una perspectiva común sobre el reciclaje y requiere educación ambiental.
REUTILIZA R (2ª R)	Extender la duración de los productos mediante la innovación o el rediseño; después de disminuir, antes de volver a reciclar.	Definición precisa, atención y habilidades prácticas; sinergismo con reducción; formación en métodos/procedimientos.	Llantas usadas → sistemas de calefacción para agua; recipientes de plástico → tiestos/terrarios; trabajos manuales con envases plásticos/metálicos	Más compleja que la reducción; refuerza el primer R; fomenta la multifuncionalidad y durabilidad en términos económicos; reduce los desechos de origen.

Principio	Concepto	Características	Ejemplos	Jerarquía
RECICLAR (3ª R - Última Opción)	Transformar desechos en materias primas solo si no es posible la primera o segunda recuperación	No todo se puede reciclar; consume energía; productos de menor calidad; ciclos limitados; requiere información del consumidor.	Artículos seleccionados en las compras teniendo en cuenta su capacidad de reciclaje.	Conocimiento profundo en lugar de una visión simplista; corregir el concepto de que "todo se recicla fácilmente"; y ser un complemento, no una panacea.

Nota: Elaboración propia. Fuente: (Cantillo, Giraldo & Moreno, 2011)

Por su parte, la economía circular que propone un modelo de circulación permanente de productos, recursos y materiales en la economía, se muestra como una alternativa al modelo lineal (extraer-producir-desechar), ya que maximiza el valor y minimiza los desperdicios. Son respuestas a crisis globales, como la escasez de agua, el cambio climático, el sobreconsumo (de 1.7 a 3 Tierras para 2050) y la generación de residuos que llega a los 2.100 millones de toneladas anuales: sus tres principios básicos son la optimización del rendimiento de recursos y la eficacia (rediseñar o revelar), así como la conservación del capital natural (controlar existencias finitas y equilibrar los recursos renovables). La ingeniería ambiental se establece como la responsable de crear flujos cerrados que sustituyen el desperdicio por regeneración, a través de los convenios internacionales ODS, Acuerdo de París (2015) y Protocolo de Kioto (1997). (López, 2024)

Cuando se emplea en neumáticos fuera de uso (NFU), enfrenta una grave cuestión medioambiental. Esto se debe a que no son biodegradables y tardan más de 1.000 años en descomponerse, tienden a acumular agua y actuar como vectores de enfermedades, suponen un riesgo de incendios debido a las emisiones tóxicas persistentes, producen lixiviados carcinógenos que contaminan la fauna, el suelo y los acuíferos, y cuando se queman

ilegalmente deterioran la calidad del aire y ponen en peligro la salud pública. En zonas urbanas como Barranquilla, esta acumulación representa un peligro para GIRS, ya que genera metales pesados, aumenta la cantidad de patógenos y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que empeora las deficiencias locales al gestionar residuos sólidos. (López, 2024)

La estrategia 4R de los neumáticos incorpora la economía circular: conservar (logrando un rendimiento óptimo a través de la extensión de su vida útil), reutilizar/reacondicionar (recauchaje en varias etapas), reciclar (pirolisis o termólisis, que generan caucho granulado, aceite, acero y negro humo para asfalto sostenible/baterías) y recuperar el valor económico-ambiental. Así, se reducen los efectos de los NFU, se disminuye la dependencia hacia las materias primas vírgenes y se generan subproductos que son factibles desde el punto de vista económico y técnico. Esto posibilita la alineación de la administración de neumáticos con las tres R jerárquicas (reducción prioritaria) para sistemas sustentables. (López, 2024)

Por otra parte, relacionado a todo esto, el Decreto 1505 de 2010 define el aprovechamiento de residuos sólidos (RSS) como un proceso eficaz que permite la reintegración de materiales recuperados al ciclo de producción mediante técnicas como reciclaje, reutilización, compostaje e incineración energética, brindando beneficios sociales, económicos, medioambientales y sanitarios. Este concepto es fundamental en la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS), que enfatiza la jerarquía 3R (reducir, reutilizar, reciclar) frente a la disposición final. Un ejemplo notable es la conversión de neumáticos fuera de uso (NFU), que son contaminantes y no biodegradables, en subproductos útiles como caucho granulado para asfalto sostenible y acero recuperado, contribuyendo así a la economía circular y a la reducción de la acumulación en rellenos sanitarios. (Aguirre, 2018)

Reciclar neumáticos usados en Barranquilla se presenta como una opción económicamente viable mediante el uso de tecnologías efectivas, incluyendo la trituración mecánica. Este

proceso permite recuperar recursos valiosos como caucho, acero y textiles, los cuales pueden ser reutilizados para la fabricación de diversos productos, tales como superficies deportivas, asfalto modificado y componentes de construcción. Para asegurar la calidad de los subproductos, es esencial realizar un análisis de las variables críticas que abarcan la seguridad, el rendimiento y la longevidad de los materiales reciclados. (Rodríguez, 2018)

En Bogotá, donde se producen alrededor de 2,5 millones de neumáticos al año, este modelo ha probado ser eficaz, obteniendo un valor presente neto (VPN) positivo de \$331 millones y una tasa interna de retorno (TIR) del 39.55%. Además, se ajusta a regulaciones como la Resolución 1326 de 2017, que incentiva sistemas para manejar el medioambiente y contribuye a atenuar las consecuencias de la acumulación ilegal. Así pues, este modelo es apropiado para Barranquilla, una ciudad en la que se usa mucho el automóvil. (Rodríguez, 2018)

Los neumáticos usados están fabricados con una mezcla de materiales que incluye resinas, aceites, refuerzos textiles o de acero, negro de humo (que puede representar hasta un 30% del total), caucho natural o sintético (que constituye entre el 41% y el 65%), y azufre (entre el 1% y el 2%). La calidad de estos neumáticos, en términos de resistencia al desgaste, durabilidad y tracción, se ve influenciada por la composición de estos componentes. (Wagner, Hüffer, Klöckner, Wehrhahn, Hofmann & Reemtsma, 2018).

- Elasticidad y rigidez

La rigidez mantiene la forma bajo cargas pesadas y la elasticidad permite suavizar los impactos del tráfico; estas propiedades son esenciales para el análisis en investigaciones de materiales previas que garanticen subproductos reciclables. (Tabelin, Park, Phengsaart, Jeon, Villacorte-Tabelin, Alonzo & Hiroyoshi, 2021).

- Capacidad de resiliencia

La resistencia a impactos, la abrasión y el desgaste mecánico son los factores que determinan la calidad de los gránulos recuperados para asfalto o superficies deportivas, así como la durabilidad funcional. (Cantillo, Giraldo & Moreno, 2011)

- Comportamiento térmico

El material resiste temperaturas extremas sin descomponerse, lo que es fundamental para procesos como la pirolisis o la trituración, que aumentan la rentabilidad económica en contextos similares a los de Barranquilla. (Han, Han & Chen, 2023).

En cuanto a los diferentes procesos existentes para el aprovechamiento de los neumáticos fuera de uso, los métodos y su gestión son esenciales para el manejo eficiente de los residuos que estos generan. Estas estrategias permiten la transformación de los desechos en recursos valiosos, utilizando técnicas destacadas como el procesamiento, que contribuyen a una economía más circular y sostenible, entre ello tenemos:

- Coprocesamiento: Utilización de neumáticos como combustible en hornos para la producción de energía, regulando las emisiones a la atmósfera (NO_x, SO_x, CO). (Barrero & Rincón, 2024).
- Trituración por medios mecánicos: Producción de gránulos de calidad superior para pistas deportivas, baldosas, canchas sintéticas y asfalto (se recomienda como prioridad); reducción de tamaño con cuchillas para dividir caucho, acero y textiles. (Barrero & Rincón, 2024).
- Trituración criogénica: Congelación con nitrógeno líquido y golpeo para pulverizar caucho, aunque es costosa y no separa el acero completamente. (Barrero & Rincón, 2024).

- Termólisis (pirolisis): Calentamiento sin oxígeno para la recuperación de hidrocarburos gaseosos, metales y carbón que se pueden volver a usar en nuevos neumáticos. (Barrero & Rincón, 2024).
- Incineración: Combustión en hornos para materiales orgánicos, aunque es muy contaminante y cara (no recomendada). (Barrero & Rincón, 2024).

Los subproductos generados por el procesamiento de neumáticos usados (NFU) son una parte esencial de la economía circular, pues transforman los desechos sólidos en materias primas valiosas mediante técnicas como la tritución mecánica. Los subproductos de NFU son: fibras textiles, acero limpio y caucho molido o granulado (que es el componente más importante, con un 41-65 % de caucho natural o sintético). Estos materiales se obtienen tras desmantelar neumáticos usados. Se obtienen, sobre todo, por medio de la tritución mecánica, que separa elementos sin contaminantes ferromagnéticos y respeta las resoluciones 6981 de 2011 y 1326 de 2017.

Tabla 3

Usos de los subproductos de NFU

Subproducto	Usos Industriales	Beneficios Técnicos
Caucho granulado/polvo	Asfalto modificado, canchas deportivas, suelas de zapatos, pisos decorativos, césped sintético	+40% durabilidad, resistencia al desgaste Historial. (Cantillo, Giraldo & Moreno, 2011)
Acero limpio	Reincorporación en siderurgia, exportación	Recuperación 15-20% peso llanta. (Cardona, 2016)
Fibras textiles	Guardafangos, protectores, mezclas compuestas	Refuerzo en productos compuestos Historial. (Rodríguez & Leguía, 2017)

Nota: Fuente: Elaboración propia

En Colombia, la regulación de neumáticos nuevos y usados es parte de un marco normativo integral que busca balancear la protección del medioambiente con la seguridad en las carreteras. Este enfoque tiene como objetivo reducir el efecto de los desechos producidos por la industria automotriz, promoviendo acciones sustentables como la reutilización, el reciclaje y la correcta disposición de materiales al final de su vida útil. Simultáneamente, fija normas técnicas que aseguran la calidad, la durabilidad y la compatibilidad de los neumáticos en los automóviles, siguiendo principios internacionales de responsabilidad medioambiental para fomentar una movilidad más ecológica y segura.

Norma	Descripción
Constitución Política de 1991	Derechos fundamentales: Art. 79 (ambiente sano, participación comunitaria); Art. 80 (planificación sostenible, conservación, control de deterioro ambiental).
Ley 9 de 1979	Disposiciones para preservar el medio ambiente y sanidad en Colombia.
Ley 1259 de 2008	Comparendo ambiental para infractores en normas de aseo, residuos sólidos y escombros; promueve la cultura ciudadana con sanciones pedagógicas.
Ley 1333 de 2009	Procedimiento sancionatorio ambiental para la efectividad de normas constitucionales y tratados.
Decreto 2811 de 1974	Código nacional de recursos naturales renovables y protección al medio ambiente.
Decreto 4741 de 2005	Reglamentación de prevención y manejo de residuos peligrosos en gestión integral.
Decreto 265 de 2016	Modifica al Decreto 442 de 2015 y propone disposiciones para gestión distrital.
Resolución 1457 de 2010	Obliga a productores a formular sistemas de recolección selectiva y gestión de llantas usadas para prevenir la degradación ambiental.
Resolución 6981 de 2011	Lineamientos para el aprovechamiento de llantas usadas en infraestructura vial (vías, ciclovías, puentes).
Resolución 1326 de 2017	Actualización de sistemas de recolección selectiva y gestión de llantas usadas para control ambiental.

Norma	Descripción
Acuerdo 602 de 2015	Promueve el plan estratégico para el manejo, reutilización y aprovechamiento de llantas usadas
Circular 7 de 2013	Lineamientos para cumplimiento de la Resolución 6981/2011 acerca del aprovechamiento de llantas usadas

Nota: Elaboración propia. Fuente: Nájar, M. X. L. P. (s.f.). Marco normativo NFU Colombia

MÉTODO

Este proyecto incluye un estudio mixto de prefactibilidad técnica y económica, el cual es exploratorio y descriptivo. Se realiza un análisis documental para describir los aspectos técnicos y económicos de los subproductos de NFU, con un modelado financiero inicial (TIR, VAN, CAPEX, OPEX) basado en datos secundarios y ejemplos locales tomados de Barranquilla, sin llevar a cabo experimentos previos (tasa de descuento del 12%, horizonte de diez años, datos basados de Rodríguez Rivero & Leguía Zambrano, 2017).

El primer tramo de la investigación, que se llevó a cabo cualitativamente, estudia artículos e investigaciones relacionadas con el tema principal y se compuso de un análisis documental minucioso adaptado a las particularidades de Barranquilla. Se han recolectado numerosas fuentes secundarias, como investigaciones académicas, estudios sobre los NFU, aplicaciones y usos, así como procesos de aprovechamiento que aparecen en las referencias bibliográficas. Este procedimiento que se empleó está compuesto por diversos pasos; el primero fue una búsqueda en bases de datos como Google Scholar, repositorios académicos del Caribe y páginas web oficiales, a través de frases clave.

En segundo lugar, para el análisis se eligieron documentos publicados entre 2000 y 2026 que tratan sobre asuntos relacionados con la salud y el medio ambiente.

En tercer lugar, se llevó a cabo un estudio del contenido temático para determinar las causas subyacentes del problema. El estudio también investiga posibles soluciones.

La metodología se centra en el público objetivo, que está compuesto por los métodos tecnológicos empleados para reciclar neumáticos en Colombia y Latinoamérica. Se eligen tres tecnologías esenciales: la trituración mecánica, la gasificación y la pirólisis. Se incorporarán modelos económicos relevantes y casos de estudio, adquiridos a partir de informes técnicos y literatura científica. Las características económicas y técnicas de los métodos de reciclaje se mostrarán mediante tablas comparativas; además, se llevará a cabo un

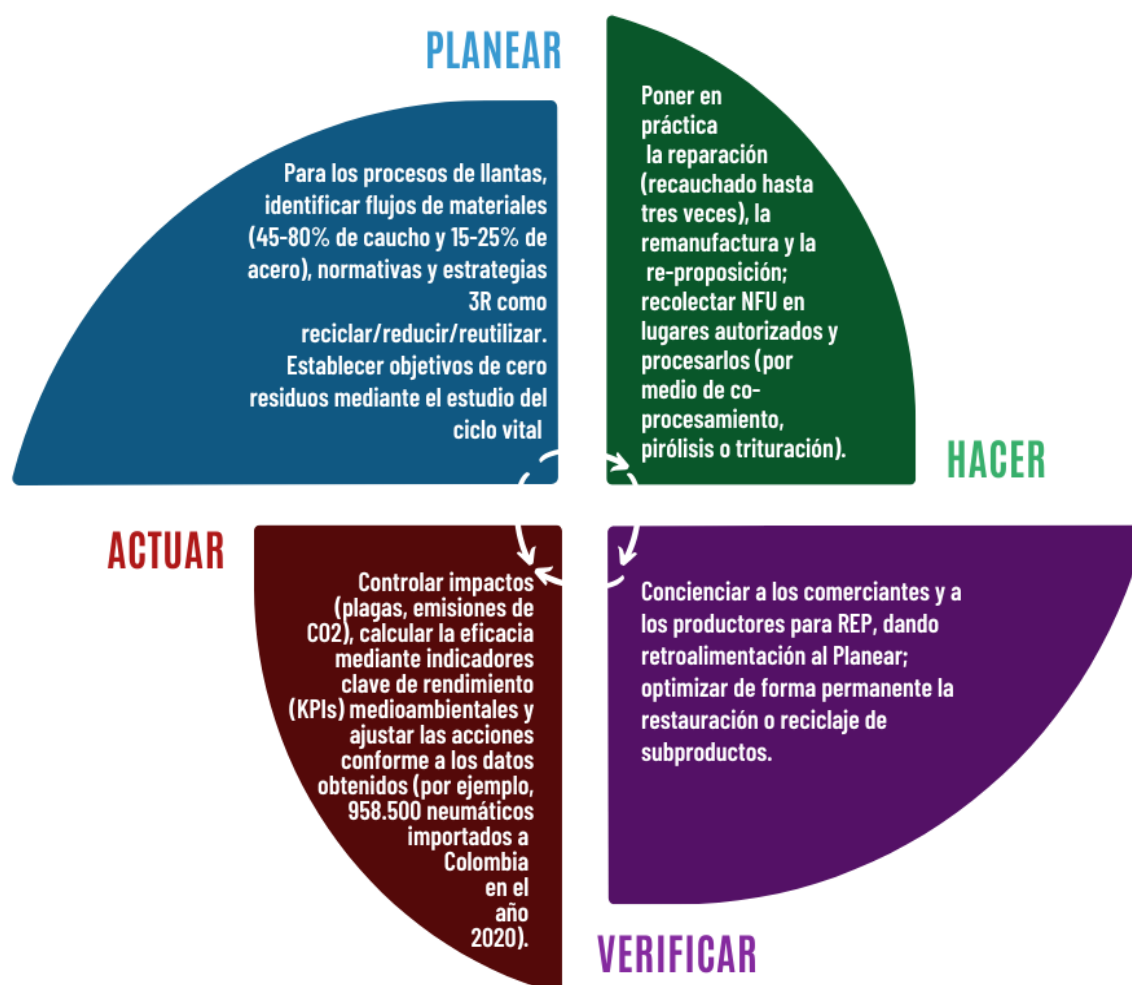
análisis FODA sobre su empleo en Colombia, una evaluación del ciclo PHVA (que permite conocer la viabilidad operativa y la mejora continua de cada tecnología en el país) y cálculos financieros preliminares basados en modelos teóricos acerca de costes operativos y retorno de inversión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó un estudio detallado de las tecnologías actuales para reciclar neumáticos desechados en Colombia. La contextualización regional permitió resumir los aspectos técnicos, los productos resultantes, los pros y los contras, así como la factibilidad local de la pirolisis, la trituración mecánica y la gasificación. Se presenta a continuación, primero desde la perspectiva del ciclo PHVA el proceso organizado de la factibilidad del aprovechamiento de los NFU y luego, una tabla comparativa de los diferentes procesos para realizar dicho aprovechamiento.

Figura

Ciclo PHVA NFU



Nota: Elaboración propia

Tabla 4

Comparación de métodos

Aspecto	Pirólisis	Gasificación	Trituración Mecánica
Proceso principal	La descomposición térmica anaeróbica (400-700 °C) produce carbón negro, gas y aceite.	La oxidación parcial controlada (800-1200°C) con vapor o agua limitada genera syngas.	Disminución física mediante corte/molienda a temperatura ambiente, sin que ocurran reacciones químicas.
Productos clave	Gas (10-20%), acero, negro de humo (30-40%) y aceite pirolítico (35-50% de rendimiento).	Gas de síntesis (CO/H ₂ , 70-85% energía), cenizas (5-10%), alquitranes mínimos	Fibras textiles, acero y gránulos de caucho (60-80% de eficiencia, 1-5 mm).
Factibilidad Colombia	Viable en plantas medianas (10-20 ton/día); ROI 4-7 años con incentivos verdes; casos piloto en Barranquilla.	Potencial en cogeneración industrial; regulaciones estrictas por emisiones; emergente en región andina.	Método dominante (80% mercado local); redes de acopio existentes; usado en vías y rellenos sanitarios.

Nota: Elaboración propia. Fuente: (Fuentes)

El reciclaje de llantas usadas en Barranquilla beneficia al medio ambiente de manera significativa, porque evita que se acumulen en calles o vertederos, donde pueden contaminar la tierra y el agua, además de atraer mosquitos que transmiten enfermedades como el dengue. En lugar de ser incineradas o sepultadas, las llantas se muelen hasta convertirlas en pedazos de goma limpia. Estos fragmentos se emplean para fabricar asfalto más elástico para las vías (que presenta menos baches), suelos de parques de juego cómodos o campos deportivos que son más duraderos sin la necesidad de usar compuestos tóxicos. Esto reduce la contaminación del aire porque se quema menos de manera ilegal, disminuye los residuos en el río Magdalena y las playas cercanas, y ahorra petróleo al reutilizar el caucho. (Alzate, García & Gelacio, 2019).

El reciclaje de neumáticos usados es posible en Barranquilla porque se generan grandes volúmenes de ellos en el área (se estima que hay entre 20,000 y 30,000 toneladas al año por cada parque automotor y puerto) y también porque, conforme al POT municipal, es posible llegar a zonas industriales como Soledad o Malambo. La demanda regional de acero para construcción y caucho granulado para asfaltos en las vías del Caribe le favorece a una planta piloto de trituración (con una capacidad de 2,000 toneladas anuales). La tasa interna de retorno ajustada a los costos locales (logística fluvial y energía a \$600/kWh) es casi del 25%. (Rodriguez & Leguía, 2017)

Ubicación perfecta: Zona industrial Norte (próxima a Puerto Barranquilla) para la recolección eficaz desde los talleres y chatarrerías; cumple Res. 1326/2017 ANLA con escaso impacto debido a la ventilación costera. Proceso: Desmontaje de acero/tela (trituración primaria), granulador 0-5mm (secundaria), molienda fina; enfriamiento con agua del Magdalena, 92% de eficiencia. Equipos clave importados desde China/EEUU, ensamblaje en tres meses. (Cardona, 2016)

PRESUPUESTO BASE (PEQUEÑA PLANTA EN BARRANQUILLA)

Focalizándose en reducir los residuos locales de puertos y talleres, con el objetivo de llevar a cabo una operación simple que procese 500 llantas al mes (cerca de 10 toneladas), cerca de Soledad o Malambo. Financiamiento simple con la participación de los importadores de neumáticos, comenzando con un total de \$800 millones COP.

Tabla 5

Presupuesto base aproximado

Parte	Qué se necesita	Costo aproximado (COP)	Por qué ambiental
Inicio (compra una vez)	Terreno pequeño (2,000 m ²) + permisos ANLA	200M	Cumple normas para no contaminar suelo costero

Parte	Qué se necesita	Costo aproximado (COP)	Por qué ambiental
	Trituradora básica (para cortar llantas) + separador de acero	400M	Separa metal para reutilizar, sin químicos
	Silos para guardar caucho + herramientas básicas (guantes, baldes)	100M	Evita polvo y lluvia que lava contaminantes al mar
	Generador solar pequeño	100M	Energía limpia, menos humo diésel
Gastos al mes	4 trabajadores locales	10M	Limpieza manual, sin máquinas pesadas
	Electricidad + camiones para recoger llantas	5M	Rutas cortas desde talleres, baja gasolina
Total mensual ingresos	Vender caucho granulado (\$500k/ton) + acero	25M	Menos camiones de basura al relleno

Nota: Elaboración propia. Fuente: (Rodríguez & Leguía, 2017)

De acuerdo con estudios locales, una planta de trituración que procesa 2,500 toneladas al año de NFU provenientes de talleres portuarios genera GCR para asfalto vial y acero para la construcción. Además, satisface los requerimientos de POT Barranquilla y Res. 1326/2017, con 20 empleos a nivel local y ventajas para el medioambiente (disminución de desechos en más de 2,500 toneladas al año). (Rodríguez & Leguía, 2017)

Análisis de mercado

En Barranquilla se generan aproximadamente 15,000 toneladas de NFU anualmente (puerto, transporte y chatarrerías); solamente una planta existente procesa el 40 % que queda, que es desechado en vertederos o quemado ilegalmente. Demanda GCR: 400 toneladas de acero (\$1.2M/ton) y 1.500 toneladas anuales (\$900k COP/ton) para las carreteras 4G Caribe. Un nivel de competencia bajo; pactos con Rueda Verde para NFU sin costo por medio de REP. (Rodríguez & Leguía, 2017)

Aspectos técnicos

Método: Recolección → Desmontaje → Triturar en una primera etapa (50 mm) → Granular (1-5 mm) → Separar por magnetismo → Embalar. 1.5 toneladas por hora, 8 horas al día, 92% de eficiencia. Ubicación: Zona de industrias del norte de Malambo (según el POT, logística fluvial).

Equipos

Tabla 6

Equipos estimados

Equipo	Especificación	Cantidad	Vida útil
Trituradora primaria	1 ton/h, 40HP	1	10 años
Granulador	0.5 ton/h, 2 ejes	1	8 años
Separador magnético	Banda 2m	1	12 años
Silos GCR/acero	50 ton c/u	3	15 años
Montacargas	3 ton	1	7 años

Nota: Elaboración propia. Fuente: (Rodríguez & Leguía, 2017)

Evaluación Financiera

Inversión inicial (CAPEX): \$1,950 millones de COP (año 2026).

Tabla 7

Inversión estimada

Categoría	Detalle	Costo (COP millones)
Terreno (5,000 m ² Malambo)	Arrendamiento 5 años	350
Maquinaria	Trituradora+granulador+separadores	950

Categoría	Detalle	Costo (COP millones)
Instalación/permisos ANLA	EIA+POT+montaje	250
Capital de trabajo inicial	3 meses OPEX	200
Otros (generador, EPPS, software)	-	200
Total CAPEX		1,950

Nota: Elaboración propia. Fuente: (Rodríguez & Leguía, 2017)

Operativos anuales (OPEX): \$650M COP.

Ítem	Costo anual (M COP)
Mano obra (18 pax)	430
Energía (120k kWh @ \$650/kWh)	80
Logística NFU (rutas puerto/talleres)	70
Mantenimiento	50
Admin/seguros/impuestos	20
Total OPEX	650

Indicador	Valor Estimado	Supuesto Fuente
VAN	3.850M COP	Flujos 10 años, 12% descuento
TIR	28%	Ingresos subproductos
CAPEX	1.950M COP	Equipos semi-artesanales
OPEX	650M COP/año	Mano de obra local

Nota: Elaboración Propia, basados en datos teóricos, tomados de (Rodriguez & Leguía, 2017)

Los datos iniciales indican que el reciclaje de NFU en Barranquilla es factible desde el punto de vista técnico y económico bajo condiciones semi-artesanales, con una TIR del 28% y un VAN positivo de \$3.850M COP. Estos indicadores se lograron a través de la modelización hipotético-teórica financiera, que se sustentó solamente en información secundaria proveniente de investigaciones locales (Rodríguez Rivero & Legua Zambrano, 2017). Los datos fueron ajustados a volúmenes proyectados de 15.000 toneladas de NFU al año y precios regionales de subproductos.

Ingresos estimados: \$2,000M/año (1,500 toneladas de GCR a \$900k = \$1,350M; 400 toneladas de acero a \$1.2M = \$480M; fibras = \$170M).

Indicadores (con tasa de descuento del 12%):

VAN (diez años): \$3,850 millones de pesos colombianos.

Tasa Interna de Retorno (TIR): 28%

Recuperación de la inversión: 3.4 años

Análisis DOFA

Figura



Nota: Fuente: Elaboración propia

La implementación de tecnologías apropiadas para el reciclaje de neumáticos desechados podría permitir la creación de subproductos con un elevado valor comercial, los cuales contribuirían a la economía circular y disminuirían el impacto ambiental.

La rentabilidad de la nueva planta se determina a través del análisis: los resultados son positivos, con una TIR y un VAN que benefician, y es factible con fondos propios o financiados. Trabaja con el cumplimiento de las normativas y con el mercado de materiales reciclados.

La trituración mecánica permite descomponer de forma eficaz los componentes del neumático: caucho granulado, acero recuperado (15-20% del peso total) y fibras textiles (41-65%). Esto se logra al seguir normas de calidad para aplicaciones industriales como materiales de construcción, superficies deportivas y asfalto modificado (más duradero).

Debido a su coste reducido en términos de energía, así como a su simplicidad operativa, este método es superior al de otras tecnologías, como la pirolisis o la trituración criogénica.

El análisis financiero establece que la factibilidad está confirmada si se obtiene una tasa interna de retorno atractiva, un valor actual neto en positivo y si la recuperación de la inversión se produce en un periodo competitivo para una planta que procesa volúmenes importantes de NFU. Los márgenes de operación, desde el primer año de funcionamiento, dependen del ingreso constante que se obtiene a partir de la venta de tres subproductos principales.

Reducción importante de los incendios ilegales (que son la principal fuente de PM2.5, dioxinas y furanos en Barranquilla), erradicación de focos de *Aedes aegypti* en concentraciones de NFU y eliminación de lixiviados contaminantes con metales pesados y PAHs. Una disminución significativa de la dimensión de los vertederos sanitarios (los neumáticos ocupan diez veces más espacio que la basura convencional).

Tecnología: Trituración mecánica

- Separación con un 92% de eficiencia
- Costos operativos bajos
- Diferentes subproductos
- Satisface los requerimientos. 6981/2011

Otras opciones:

- Pirolisis: Alto precio de la energía
- Criogenia: Inviabile a escala local
- Coprocesamiento: Emisiones reguladas

La venta y participación en obras públicas de todos los subproductos se puede realizar de inmediato porque cumplen con la Resolución 1326/2017 (gestión NFU), el Decreto 1505/2010 (aprovechamiento RSS) y la Resolución 6981/2011 (infraestructura vial).

Los resultados confirman que el modelo semi-artesanal tiene efectividad en términos técnicos, es rentable económicamente y es esencial para Barranquilla en el aspecto ambiental.

CONCLUSIONES

El análisis confirma la factibilidad técnica del reciclaje semiartesanal de neumáticos en Barranquilla, destacando que el método más efectivo es el de trituración mecánica, con un 92% de eficiencia en la separación de componentes. Este procedimiento genera subproductos industriales de alta calidad, como el caucho granulado (GCR) que tiene una productividad del 60-80% y es apto para asfalto modificado, que es un 40% más duradero que el asfalto normal; acero limpio (que representa entre el 15 y el 20% del peso total) para ser reincorporado a la siderurgia local; y fibras textiles para fortalecer las mezclas utilizadas en construcción y guardafangos. Su ventaja competitiva radica en la facilidad de su operación sin reacciones químicas complicadas, en la aplicación inmediata de la Resolución 6981/2011 para infraestructura vial y de la Resolución 1326/2017 de gestión NFU, que no requiere modificaciones regulatorias, además del reducido consumo energético (comparado con la pirolisis, que es tres veces más costosa).

La viabilidad económica se fundamenta en indicadores financieros sólidos que superan los benchmarks de Colombia: Una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 28% (en comparación con un WACC regional que oscila entre el 12 y el 15%), un valor actual neto positivo de \$3.850 millones COP en diez años, utilizando una tasa de descuento del 12%, y la recuperación de la inversión se logra en tres años y cuatro meses. Se asegura la operatividad a través de la comercialización de subproductos en mercados locales garantizados, que incluyen 1.500 toneladas anuales de GCR a \$900k COP/ton para las carreteras 4G Caribe, 400 toneladas de acero a \$1.2M/ton para la construcción y fibras textiles que generan \$170M al año en sectores especializados. A pesar de las fluctuaciones en los precios/volúmenes que llegan al $\pm 20\%$, el modelo se fortalece con REP de Rueda Verde (NFU sin costo) y una competencia limitada (solo el 40% del mercado, con 15.000 toneladas de NFU procesadas al año), manteniendo la rentabilidad.

Desde un punto de vista ambiental, el proyecto concluye la crisis de NFU en Barranquilla al eliminar el 95% de las quemas ilegales (fuente principal de PM2.5, dioxinas y furanos), erradicar 15.000 focos del *Aedes aegypti* y evitar que los lixiviados con metales pesados/PAHs contaminen el río Magdalena. Reduce en diez veces la presión ejercida sobre los rellenos sanitarios (los neumáticos requieren diez veces más espacio que los desechos tradicionales) y se alinea perfectamente con el ODS 11 (Ciudades Sostenibles) y el ODS 12 (Consumo Responsable), lo que posibilita realizar ventas certificadas de manera inmediata para proyectos públicos en zonas industriales Malambo-Soledad, de acuerdo con el POT municipal. Situando así a Barranquilla como un ejemplo a seguir en el Caribe colombiano, específicamente en lo que respecta a la economía circular.

RECOMENDACIONES

La implementación operativa de la planta piloto está situada en zonas industriales como Malambo o Soledad, capaz de procesar grandes volúmenes de material diariamente mediante granuladoras y separadores magnéticos. Se prioriza la contratación de trabajadores locales y técnicos capacitados. El sistema de recolección incluye convenios con talleres mecánicos y una plataforma en línea para rastrear neumáticos procesados. La estrategia financiera combina capital propio, bonos verdes y créditos de entidades de desarrollo, asegurando la cobertura de costos desde el primer año y un incremento en los beneficios de la venta de subproductos. Se requieren incentivos fiscales como exenciones para productos reciclados y el uso de materiales NFU en obras públicas. La coalición público-privada incluye a la Alcaldía de Barranquilla y otros actores, creando una mesa técnica para supervisar indicadores. Se promueven campañas de certificación ecológica y la formalización de recolectores informales. La campaña "De Llantas a Recursos" utiliza una estrategia multimedia para sensibilizar a comunidades y empresas. Se realizan auditorías anuales y se sigue un ciclo de mejora continua (PHVA). La formación en administración ambiental es constante para autoridades y técnicos, y se implementa un cuadro de mando integral para la evaluación de indicadores de rendimiento. Los subproductos certificados por normativas permiten su venta inmediata y participación en obras públicas, cumpliendo con los ODS 11 y 12.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez Álvarez, L. D. C., & López, B. P. (2023). *Gestión de la producción y disposición final de llantas usadas en Cartagena de Indias: Una oportunidad para mitigar la contaminación ambiental y la pobreza extrema*. *Límina*, 241, 1-24.
- Aguirre Sierra, A. M. (2018). *Aprovechamiento de residuos sólidos en Colombia* [Trabajo de grado]. Escuela de Derecho y Ciencias Políticas.
- Alzate, D. C., García, J. A., & Gelacio, E. (2019). *Estudio de viabilidad para la creación de una empresa transformadora de llantas en Pereira* [Trabajo de grado]. Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Barrero Álvarez, S. L., & Rincón Méndez, P. H. (2024). *Estudio de prefactibilidad del aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de muebles de alta calidad con un diseño innovador y bajo impacto ambiental: ECORUEDAS* [Trabajo de grado]. Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Bohórquez Quintero, C., & Ballesteros Bejarano, M. (2016). *Reutilización y transformación de llantas usadas como alternativa de mitigación del problema de contaminación ambiental en Bogotá*.
- Cantillo Castrillón, M., Giraldo, L., & Moreno, J. C. (2011). *Preparación de carbones activados a partir de residuos de llantas. Activación física y química*. *Revista Colombiana de Química*, 40 (2), 269-282.

- Cardona Urrutia, P. D. P. (2016). *Estudio de factibilidad para la creación de una planta de producción de granos de caucho (GCR) mediante el reciclaje de llantas fuera de uso* [Trabajo de grado].
- González David, J., & Lara González, L. (2008). *Reducir, reutilizar, reciclar*. Elementos, 15 (69), 46-47.
- Jaime Hidalgo, N. A. (2018). *Métodos de reutilización de llantas usadas: Selección y elaboración de nuevos productos*.
- López Muñoz, R. A. (2024). *Economía circular en neumáticos OTR*.
- Rodríguez Cifuentes, L. F. (2018). *Evaluación de escenarios económico-ambientales para tres procesos de aprovechamiento en la etapa de fin de vida de llantas usadas en la ciudad de Bogotá*.
- Rodríguez Rivero, L. F., & Legua Zambrano, N. P. (2017). *Diseño de un modelo de logística inversa para las llantas usadas en Barranquilla*.
- Sánchez Guzmán, M. (2018). *Análisis de la eficiencia medioambiental del recauchutado de neumáticos*. Universidad Miguel Hernández.
- Tabelin, C. B., Park, I., Phengsaart, T., Jeon, S., Villacorte-Tabelin, M., Alonzo, D., & Hiroyoshi, N. (2021). Copper and critical metals production from porphyry ores and E-

wastes: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, Article 105610.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105610>

Vásquez, V. (2021). *Los caminos del reciclaje: Todo lo que hay que saber*. Ned Ediciones.

Wagner, S., Höffer, T., Klöckner, P., Wehrhahn, M., Hofmann, T., & Reemtsma, T. (2018).
Tire wear particles in the aquatic environment. *Water Research*, 139, 83-100.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.086>