

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE LLANTAS DE
UN PROCESO DE VALORIZACIÓN A PARTIR DE CRITERIOS
SOCIOECONÓMICOS Y AMBIENTALES EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.**

ANGIE CATALINA TRUJILLO ANGULO

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD**

ORIENTADOR

CLAUDIO ALBERTO MORENO ARIAS

INGENIERO MECÁNICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD

BOGOTÁ D.C.

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre

Firma del Director

Nombre

Firma del Presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la universidad y rector del claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Pena

Vicerrectora Académica y de Investigación

Dra. María Fernanda Vega De Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavidez Trujillo

Secretario General

Dr. José Luis Macias Rodríguez

Decana Facultad de Ingeniería

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora Maestría en Gestión Ambiental para la Competitividad

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

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

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS	13
1. MARCO TEÓRICO	14
1.1. Composición de las llantas	14
1.2. Contaminación de residuos de llantas	17
1.3. Valorización de residuos	18
1.4. Ciclo de vida de un producto	20
1.5. Marco legal	24
2. METODOLOGIA	26
2.1. Identificar las características de los residuos de llantas en función de la fuente de generación y el potencial de aprovechamiento en Bogotá D.C.	26
2.1.1. <i>Definir el área de influencia</i>	26
2.1.2. <i>Identificar el parque automotor</i>	27
2.1.3. <i>Evidenciar los desechos mediante los programas de posconsumo</i>	27
2.1.4. <i>Consolidación de la información recolectada</i>	27
2.2. Analizar comparativamente los procesos de valorización de los residuos sólidos de llantas	27
2.2.1. <i>Identificar los procesos de valorización</i>	27

2.2.2. <i>Comparación y selección de los procesos de valorización</i>	28
2.3. Determinar la sostenibilidad del proceso de valorización seleccionado mediante la herramienta de análisis de ciclo de vida de los residuos de llantas	30
2.3.1. <i>Análisis del ciclo de vida</i>	30
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
3.1. Identificación de las características de los residuos de llantas en función de la fuente de generación y el potencial de aprovechamiento en la ciudad de Bogotá	33
3.1.1. <i>Área de influencia</i>	33
3.1.2. <i>Parque automotor de Bogotá D.C</i>	35
3.1.3. <i>Generación de llantas usadas</i>	36
3.1.4. <i>Gestión de llantas usadas en Bogotá D.C.</i>	39
3.1.5. <i>Caracterización de las llantas</i>	42
3.2. Análisis comparativo de los procesos de valorización de los residuos sólidos de llantas	45
3.2.1. <i>Identificación de los procesos de valorización</i>	45
3.2.2. <i>Comparación y selección de los procesos de valorización</i>	53
3.3. Determinación de la sostenibilidad del proceso de valorización seleccionado mediante la herramienta de análisis de ciclo de vida de los residuos de llantas	59
3.3.1. <i>Objetivo y alcance ACV</i>	60
3.3.2. <i>Análisis de inventario</i>	61
3.3.3. <i>Evaluación de impactos</i>	64
4. CONCLUSIONES	76
REFERENCIAS	77

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Comparación economía lineal y economía circular	19
Figura 2. Procesos de valorización de residuos	20
Figura 3. Etapas del ciclo de vida de un producto	21
Figura 4. Impactos ambientales en las etapas del ciclo de vida de un producto	23
Figura 5. Modelo AHP	29
Figura 6. Pasos para ACV	31
Figura 7. Ubicación de Bogotá	33
Figura 8. Cantidad de llantas usadas recolectadas en vías públicas	37
Figura 9. Caracterización de residuos sólidos especiales y RCD	38
Figura 10. Cantidad de llantas aprovechadas por año	41
Figura 11. Proceso de trituración mecánica de llantas	47
Figura 12. Diagrama de proceso de pirólisis	48
Figura 13. Productos de llantas recicladas	51
Figura 14. Coprocesamiento de llantas usadas	52
Figura 15. Estructura jerárquica del caso “selección de un proceso de valorización”	58
Figura 16. Comparación por pares	58
Figura 17. Resultados obtenidos en superdecisions	59
Figura 18. Alcance del ACV	60
Figura 19. Diagrama de proceso trituración	62
Figura 20. Diagrama de proceso pirólisis	64
Figura 21. Entradas y salidas de trituración mecánica	66
Figura 22. Entradas y salidas de pirólisis	67

Figura 23. Resultado de acidificación	67
Figura 24. Resultados de cambio climático	68
Figura 25. Resultados de ecotoxicidad	69
Figura 26. Resultados de eutrofización	70
Figura 27. Resultados de toxicidad humana	71
Figura 28. Resultados de agotamiento de ozono	72
Figura 29. Diagrama de flujo planta de pirólisis de llantas	74

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales componentes de las llantas	15
Tabla 2. Composición química de las llantas	16
Tabla 3. Fases del ciclo de vida de un producto	22
Tabla 4. Marco normativo en Colombia	24
Tabla 5. Escala de importancia relativa – Modelo AHP	30
Tabla 6. Parque automotor de Bogotá	36
Tabla 7. Caracterización de las llantas	43
Tabla 8. Generación y valorización de residuos de neumáticos a nivel mundial	46
Tabla 9. Comparación de los métodos de valorización de llantas	54
Tabla 10. Balance de masa proceso de trituración de llantas	61
Tabla 11. Balance de masa proceso de pirólisis	63
Tabla 12. Impactos ambientales del ACV	65

RESUMEN

En el presente estudio se desea analizar el ciclo de vida de un proceso de valorización de llantas usadas enfocado a la ciudad de Bogotá D.C, Colombia. Como primera instancia se identifica la generación de residuos en la ciudad, a pesar de que actualmente cuentan con programas posconsumo de llantas, aún se refleja la inadecuada disposición de este tipo de residuos en las vías públicas y parques.

Se destacan los procesos que se emplean actualmente en la ciudad y que pueden ser potencialmente enriquecedores para el mejoramiento del medio ambiente, así mismo que pueda aportar a un enfoque de economía circular, a medida que va avanzando la investigación y se realiza la respectiva comparación, se selecciona el proceso a evaluar.

Por último, se realiza un análisis de ciclo de vida con el fin de identificar los beneficios y desventajas de la implementación del proceso seleccionado, este se basa en la normatividad planteada en las normas ISO 14040:2016 e ISO 14044:2016, realizando una interpretación de los impactos ambientales seleccionados durante la investigación.

Frente a la investigación realizada se evidencia que en el proceso de valorización pirólisis de llantas se determinan varios beneficios, donde se destacan los beneficios ambientales y económicos reduciendo la necesidad de producir nuevos productos con materias primas vírgenes, se recuperan materiales que pueden ser reutilizados, los impactos ambientales evaluados como la acidificación, ecotoxicidad, agotamiento del ozono estratosférico, eutrofización y calentamiento global presentan un impacto positivo al implementar este proceso, en donde se identifica la eficiencia del proceso el cual proporciona datos para la toma de decisiones que pueden ser asertivas para la implementación de sostenibilidad en el proceso.

Palabras clave: Valorización, ciclo de vida, pirólisis, llantas usadas, gestión de residuos.

INTRODUCCIÓN

Recientemente se ha visto reflejado un aumento del uso de neumáticos en la vida cotidiana de la humanidad, debido a la sobrepoblación en la que se vive, aumenta el uso de vehículos, bicicletas, motocicletas y demás medios de transporte. Los neumáticos son un gran flujo de contaminación debido a las quemaduras que se realizan con estos cuando termina su vida útil, generando así un aumento de mercurio, plomo o dióxido de carbono, por lo cual impacta en un alto grado de toxicidad en el medio ambiente. Esto es un problema ambiental a nivel mundial ya que no se eliminan de manera adecuada y no hay muchos mecanismos de mitigación de las emisiones que estas generan. (Zenen Rodríguez, et, al. 2022).

En Colombia se producen 950.000 llantas usadas al año, las cuales no tienen una buena disposición, estos materiales no son reciclables y por ende generan un daño ambiental muy grave para la atmósfera emitiendo dióxido de carbono, por eso el Decreto 442 de 2015 prohíbe abandonar las llantas en espacios públicos, enterrarlas suponiendo un método de eliminación y disposición final, almacenarlas a cielo abierto o usarlas en procesos de combustión. (Semana, 2021).

Según cifras de la DIAN (DIAN, 2021) en Colombia en el año 2020 se importaron 1.350.000 llantas, de las cuales se reencauchó solo el 29% y el total de llantas usadas que terminaron en calles y rellenos sanitarios es de 958.500 unidades.

Dentro de la composición de las llantas se tienen metales pesados como el Zinc, Cromo, Níquel, Plomo y Cadmio, lo cual su base es tóxica así se contengan en bajas concentraciones, estos metales representan un riesgo para los organismos vegetales debido a que tiene una capacidad de biotransformación, bioacumulación y persistencia, haciendo que permanezcan en los ecosistemas por largos periodos de tiempo siendo estos difíciles de degradar de una forma natural (Ferrer, 2003).

Debido al alto consumo de los medios de transporte en el país, los residuos de llantas usadas se van incrementando aún más, amontonándolos en vertederos o depósitos de chatarras y en algunas ocasiones son quemados al aire libre generando gran contaminación ambiental y reduciendo la calidad de vida de los ciudadanos, debido a

los metales pesados que contienen generan cáncer y demás enfermedades que pueden llevar a la muerte a un ser humano, debido a que están expuestos grandes cantidades del contaminante.

La contaminación también puede generar malformaciones en los fetos, la cantidad de plomo que se tiene en el cuerpo afecta la conducta de los niños principalmente, problemas neuronales, entre otras enfermedades.

Estos residuos pueden liberar sustancias químicas al aire, suelo y cuerpos hídricos, en su mayoría se ve afectado por la exposición al sol en el aire libre ya se comienza a liberar gas metano, aumentando la huella de carbono y por ende la generación de gases de efecto invernadero. Cuando son quemados liberan humo negro tóxico por los altos componentes de hidrocarburos que este contiene, la contaminación de los suelos también es generada por el tiempo en que se dejan en exposición estos residuos, haciendo que las bacterias que ayudan a fortalecer la flora y fauna sean removidas y por ende mueren estas especies.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar el ciclo de vida de los residuos sólidos de llantas a partir de un proceso de valorización que representa los mejores beneficios socioeconómicos y ambientales en la ciudad de Bogotá D.C.

Objetivos específicos

- Identificar las características de los residuos de llantas en función de la fuente de generación y el potencial de aprovechamiento en Bogotá D.C.
- Analizar comparativamente los procesos de valorización de los residuos sólidos de llantas.
- Determinar la sostenibilidad del proceso de valorización seleccionado mediante la herramienta de análisis de ciclo de vida de los residuos de llantas usadas.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se realizará una descripción de los términos más fundamentales para el desarrollo de este proyecto. Se tienen en cuenta las ideas principales de los objetivos y sus alcances.

1.1. Composición de las llantas

En términos generales una llanta es una mezcla de diferentes materiales en donde se presentan aproximadamente 200 materiales para su fabricación, alguno de los materiales usados son el acero, textiles, caucho natural, caucho sintético, poliéster, entre otros, esto también depende del uso que se le va a dar a la llanta, es decir, si es para automóviles, camiones, bicicletas, entre otros medios de uso de llantas.

Cada uno de los componentes de la llanta aporta una propiedad importante para la durabilidad del producto, donde se destaca el uso del petróleo para la fabricación del caucho sintético el cual se usan aproximadamente 32 litros de petróleo para el neumático de automóvil y 100 litros para neumáticos de camiones (Tik Root, 2019), como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1.*Principales componentes de las llantas*

Material (% en peso)	Neumáticos para turismo	Neumáticos para camiones	Neumáticos todoterreno
Caucho natural	14-22	27-30	14-22
Caucho sintético	23-27	14-15	23-27
Negro carbón	28	20-28	22
Acero	13-15	14-25	12
Oxido de zinc	1	2	2
Tejidos, rellenos, aceleradores, antiozonantes	14-17	10-17	10
Otros	8,5	5	7
Peso neumático nuevo (kg)	8,5-11	54-65	27-74
Peso neumático de desecho (kg)	7-9	45-56	21-64

Nota. Composición de la llanta enfocándose en el automóvil y camión los cuales son las de mayor desecho. Tomado de: Ziyad Tariq Abdullah (2024), Remanufactured waste tire by-product valorization: Quantitative–qualitative sustainability-based assessment, Results in Engineering, Volume 22, 102229, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102229>.

Cuenta con propiedades fisicoquímicas que básicamente le permiten al material resistir altas y bajas temperaturas, la humedad y sequía, cargas pesadas, la exposición al oxígeno, aceites, la luz solar, combustibles, se pueden deformar en lo más mínimo posible, entre otras.

Uno de los materiales que más se destaca en las llantas es el negro de humo el cual le ayuda a la dureza y a la consistencia de esta el cual tiene un alto contenido de carbono, el azufre también es mayormente usado para endurecer la llanta, las fibras de acero son esenciales para la consistencia y fortalecimiento de la llanta y el uso de antioxidantes para lograr una mayor durabilidad en el producto y así reducir los daños por la luz solar, en la tabla 2, se presentan algunos componentes químicos de los neumáticos.

Tabla 2.*Composición química de las llantas*

Elemento/Compuesto	Contenido	Unidad
Carbono (C)	70	%
Hierro (Fe)	15	
Hidrogeno (H)	7.0	
Oxigeno (O)	4.0	
Oxido de zinc (ZnO)	1.0	
Azufre (S)	1.0	
Nitrógeno (N)	0.5	
Acido esteárico	0.3	
Halógenos	0.1	
Cadmio (Cd)	10	mg/kg
Cromo (Cr)	90	
Níquel (Ni)	80	
Plomo (Pb)	80	
Ligandos cupríferos	200	

Nota. Identificación de los componentes químicos que tiene la llanta y su contenido. Tomado de: Vargas, O. M. (2013). Evaluación de Caucho Recuperado de Llantas Usadas Como Material Adsorbente en Medio Acuoso, 78.

Las llantas son las partes de los vehículos que entran en contacto con el suelo y permiten el desplazamiento. Las llantas tienen diferentes características que influyen en su rendimiento, seguridad y durabilidad. Algunas de las características más importantes son:

Medida: Es el conjunto de números y letras que indican el ancho, la altura, el diámetro y el índice de carga y velocidad de la llanta. Por ejemplo, 205/55 R16 91V significa que la llanta tiene un ancho de 205 mm, una altura del 55% del ancho, un diámetro de 16 pulgadas, una carga máxima de 615 kg y una velocidad máxima de 240 km/h.

Tipo: Es la clasificación de las llantas según su diseño, material y uso. Existen varios tipos de llantas, como las radiales, las diagonales, las run flat, las all season, las de invierno, las de verano, las ecológicas, las deportivas y las off road. Cada tipo tiene sus ventajas y desventajas según el clima, el terreno y el estilo de conducción.

Desgaste: Es el deterioro gradual de la superficie de la llanta debido al uso y al tiempo. El desgaste afecta la adherencia, la estabilidad y la seguridad de la llanta. Para medir el desgaste se puede usar un indicador de profundidad o un medidor de presión. Se recomienda cambiar las llantas cuando la profundidad del dibujo sea menor a 1.6mm.

1.2. Contaminación de residuos de llantas

La producción de las llantas comprende diferentes procesos y uso de materia prima, donde la gran mayoría provienen de los recursos naturales como en el caso del caucho natural el cual la mayor parte de este se obtiene de los árboles de caucho.

En la fabricación del caucho sintético se usa mayormente el petróleo para fortalecer sus propiedades, sabiendo así que el uso de los derivados del petróleo aporta una gran contaminación a la atmosfera, suelos, cuerpos hídricos, entre otros.

Cuando las llantas llegan al final de su vida útil en la mayoría de las veces se desechan a los vertederos, rellenos sanitarios, espacios públicos (parques, lagos, calles, ríos) y son almacenadas en depósitos clandestinos, techos de las viviendas, entre otros (Min Ambiente, 2021), el cual conlleva grandes consecuencias debido a la exposición al aire haciendo que se liberen sustancias químicas que contaminan el aire, los suelos y el agua, o con el hecho de ser expuestas al sol por un tiempo prolongado estas liberan gas metano a la atmosfera aportando al incremento de la huella de carbono (Eco Green, 2021).

La inadecuada disposición de este desecho hace que incremente la proliferación de vectores como lo son las ratas y mosquitos por la acumulación de aguas, lo cual estos

transmiten enfermedades que afectan a la salud pública como lo es el dengue, fiebre amarilla y entre otras enfermedades.

En ocasiones este desecho es quemado con el fin de “desaparecerlo” o para extraer el hierro que se encuentra internamente, pero este proceso trae consigo una alta contaminación al aire ya que este libera nubes de humo negro tóxico, debido al contenido de combustibles fósiles y productos químicos, haciendo que las partículas se extiendan por el aire afectando la flora y fauna (Ardila, Arriola. 2021).

1.3. Valorización de residuos

La valorización de residuos comprende actividades como el reciclaje, reutilización, recuperación energética, entre otras, con el fin de que pueda sustituir otros materiales reduciendo así los impactos negativos al medio ambiente.

Existen dos tipos de valorización de residuos, una de ellas es la valorización energética el cual refiere a los desechos que son difíciles de reciclar o que no pueden ser reciclados que puedan ser una fuente de energía teniendo en cuenta que pueden ser fuente renovables o alternativas, y por otro lado está la valorización de residuos sólidos el cual se basa en los residuos no peligrosos con el fin de volverlos a incorporar en el proceso de producción de algún otro producto. En la figura 1 se presenta una breve comparación de economía lineal y economía circular.

Figura 1.

Comparación economía lineal y economía circular



Nota. Se presenta comparación entre energía lineal y energía circular teniendo en cuenta la valorización de residuos en los procesos industriales. Tomado de: ATRIA Innovación (2020). Guía de valorización de residuos. <https://www.atriainnovation.com/guia-de-valorizacion-de-residuos/>

Se tienen presentes diferentes beneficios a la hora de valorizar los residuos, uno de ellos es la reducción de generación de residuos la cual aporta beneficios a los vertederos y a la contaminación de suelos, cuerpos hídricos y aire, otro de sus beneficios es la mejora en la rentabilidad económica de los procesos industriales lo cual genera una reducción de costos en la compra de materias primas lo cual es muy favorable la reutilización de residuos, adicional a esto se reduce una gestión adicional de los residuos generados durante el proceso de fabricación.

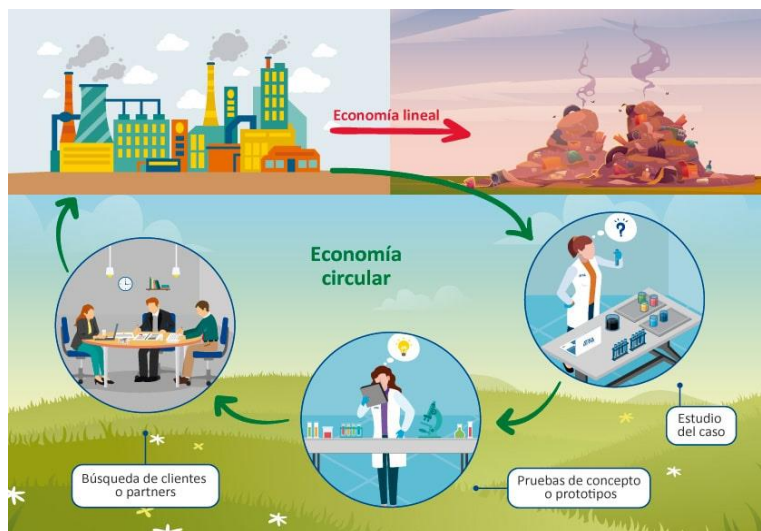
Otros de los beneficios obtenidos por la valorización de residuos es la creación de nuevas empresas o puestos de trabajo que aporten ideas innovadoras en los procesos y rescatando el potencial humano en las compañías, por último, pero no menos importante la reducción del impacto ambiental para garantizar la sostenibilidad de la vida del planeta.

Para realizar este proceso de valorización se tienen en cuenta algunos criterios con el fin de identificar las características del residuo y así saber los beneficios que puede aportar. Uno de los aspectos a tener en cuenta es la caracterización del residuo el cual determina la composición del mismo, la selección de la vía de reutilización y valorización en la cadena de valor del producto, en la figura 2 se representa el proceso de valorización de un residuo, donde se estudian las técnicas o procesos necesarios

para que el residuo este en óptimas condiciones para poder ser reincorporado en el proceso, en ocasiones se realizan pruebas con el residuo para determinar los beneficios y las oportunidades de mejora para poder ser incorporado y por último la industrialización el cual se encarga de implementar todos los procesos anteriormente mencionados en uno solo.

Figura 2.

Procesos de valorización de residuos



Nota. Pasos para determinar la viabilidad de los residuos para poder ser incorporados en la fabricación de un producto. Tomado de: ATRIA Innovation (2020). Guía de valorización de residuos. <https://www.atriainnovation.com/guia-de-valorizacion-de-residuos/>

1.4. Ciclo de vida de un producto

El ciclo de vida de un producto es un transcurso en la línea del tiempo que sucede desde su divulgación en el mercado hasta su expiración (Godas, 2006). Es decir, que comprende las fases a través de las cuales un producto pasa de su entrada a la economía hasta la salida de este.

Por lo que, en el ciclo de vida de un producto, existe la gestión integrada del sistema logístico interno en el cual se analiza el flujo del material donde se encontrarían los proveedores, posteriormente, el aprovisionamiento, luego la producción y por último la distribución final a los clientes y cuando se obtenga dicha información, se debe estudiar

los impactos ambientales que el mismo genera, en la figura 3 se representan estas etapas.

Figura 3.

Etapas del ciclo de vida de un producto



Nota. Se presentan las etapas del ciclo de vida de un producto con el fin de identificar los procesos donde es necesario intervenir. Tomado de: Reyes Sonia, 2024. El análisis del ciclo de vida y su importancia para transitar hacia la economía circular. <https://www.plastico.com/es/noticias/el-analisis-de-ciclo-de-vida-y-su-importancia-para-transitar-hacia-una-economia-circular>

Para realizar dicho estudio, es necesario analizar los subsistemas logísticos del producto, el cual se divide en:

- Subsistemas de entrada: En esta etapa se deben tener en cuenta las actividades de aprovisionamiento y de almacenamiento.
- Subsistemas de producción: Aquí se deben examinar las actividades de mantenimiento, empaque y paletizado o su correspondiente transporte o logística interna.
- Subsistema de salida: Allí se deben distinguir las actividades de aislamiento, carga, despacho y distribución.

En estas etapas es necesario identificar el conjunto de recursos, acciones y medios que permiten que los productos lleguen desde el lugar de producción a los consumidores, por lo que, estos elementos contribuyen a agregarle valor al producto. En la tabla 3, se da un panorama más amplio de las fases tenidas en cuenta para determinar el ciclo de vida de un producto.

Tabla 3.

Fases del ciclo de vida de un producto

FASE DE APROVISIONAMIENTO	FASE DE PRODUCCIÓN	FASE DE DISTRIBUCIÓN
<ul style="list-style-type: none"> • Materia prima • Energía • Insumos • Materiales • Costes de desarrollo 	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso de generación de productos • Energía • Manutención • Control de desechos 	<ul style="list-style-type: none"> • Logística • Almacenamiento • Transporte • Recolección de desechos • Reciclaje
<p>Esta fase es la encargada de surtir y abastecer los materiales, materias primas e insumos necesarios para el sistema de producción.</p>	<p>Ocurre la transformación de los materiales de la fase de aprovisionamiento para la generación de productos que satisfacen la demanda de los mercados.</p>	<p>Es la participación de todas las funciones necesarias para que el producto llegue al comprador final</p>

Nota. Descripción de las 3 fases del ciclo de vida de un producto, en donde se describe la fase de aprovisionamiento, fase de producción y finalmente la fase de distribución.

Ahora bien, el análisis del ciclo de vida de un producto puede facilitar la evaluación del impacto ambiental que se genera. Como se observa en las fases previamente descritas, todos los movimientos para el empleo y producción de materias primas y su

aporte de emisiones al ambiente, a lo que se incluye hasta el transporte utilizado antes de la producción. Posteriormente, se encuentra el transporte de terminación al comprador final, el uso del producto acabado y su vida útil, consiguiendo su reutilización y por último la gestión de su residuo (Verdes, s.f.)

Por lo que, tener este conocimiento servirá para mejorar el uso de los recursos y minimizar dichos efectos que se están generando en cada parte del proceso. Para lograr esto, es necesario estimar los impactos ambientales relacionados al producto final y su producción, reconociendo la materia y energía y también las emisiones generadas, en la figura 4 se representan las etapas y dichos impactos que se generan, esto con el propósito de según lo evaluado llevar a cabo unas estrategias para disminuir lo que genera impacto o daños ambientales (López, 2016).

Figura 4.

Impactos ambientales en las etapas del ciclo de vida de un producto



Nota. Demostración de las etapas de ciclo de vida de un producto y las salidas que se tienen presentes y los impactos ambientales. Tomado de: Román López Teresa. (2017, enero 11). Análisis de Ciclo de Vida de un producto, qué es, objetivo, origen, cómo se realiza, beneficios. Recuperado de <https://gestiopolis.com/analisis-del-ciclo-vida-producto/>

1.5. Marco legal

En este proyecto se tiene en cuenta la normatividad legal vigente en la ciudad de Bogotá, en relación con el cumplimiento legal de los residuos de llantas, se presenta un resumen detallado en la tabla 4.

Tabla 4.

Marco normativo en Colombia

NORMATIVIDAD	ENTE REGULATORIO	DESCRIPCIÓN
Constitución política de Colombia de 1991	Asamblea nacional de constituyentes	Se tienen contemplados los artículos 79 y 80, en base a los derechos fundamentales del ciudadano, asegurando la protección de la diversidad e integridad del ambiente y el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales
Ley 9 de 1979	Congreso de Colombia	Donde se dictan disposiciones para dar cumplimiento a la preservación del medio ambiente y medidas sanitarias para la salud pública
Ley 1259 de 2008	Congreso de la Republica	Se crean comparendos para los infractores que dañen el medio ambiente con la mala disposición de los residuos sólidos y de escombros
Resolución 1457 de 2010	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo social	Sistemas de recolección selectiva y de gestión ambiental de las llantas usadas
Resolución 6981 de 2011	Secretaria distrital de movilidad y	Aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, teniendo en cuenta también las llantas no

	secretaria distrital de ambiente	conformes que se contemplen en el territorio nacional
Decreto 442 de 2015	Alcaldía Mayor de Bogotá D.C	Por medio del cual se crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones
Acuerdo 602 de 2015	Concejo de Bogotá D.C	Por el cual se adopta el plan estratégico para el manejo, reutilización y aprovechamiento de las llantas usadas de la ciudad de Bogotá
Conpes 3874 de 2016	Departamento nacional de planeación (DNP)	Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos, responsabilidades de los sectores públicos y privados que se relacionan con el tema
Decreto 265 de 2016	Alcaldía mayor de Bogotá D.C	Se modifica el decreto 442 de 2015 y se adoptan otras disposiciones
Resolución 1326 de 2017	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se adoptan otras disposiciones

Nota. Marco normativo que regula la gestión de residuos sólidos y demás disposiciones de la ley. Elaboración propia.

2. METODOLOGIA

Para la ejecución del análisis del ciclo de vida de los residuos sólidos de llantas de un proceso de valorización que representa los mejores beneficios socioeconómicos y ambientales en la ciudad de Bogotá D.C, se define una metodología de investigación cuantitativa, con el fin de proporcionar información que pueda aportar para la toma de decisiones en futuros proyectos, teniendo en cuenta los diferentes puntos de vista de los demás investigadores. Debido a lo anteriormente mencionado se desarrolla el tema propuesto basándose principalmente en la revisión de fuentes secundarias de información.

En cuanto a este enfoque cuantitativo, se realiza mediante identificación de las bases de datos disponibles con el fin de obtener información secundaria, como pueden ser bibliotecas virtuales, informes, artículos de revistas científicas que tienen relevancia frente al tema, repositorios, entre otros recursos digitales. Con respecto a la búsqueda de información se usa principalmente Google académico, SCiencedirect, Scopus, Lumieres (repositorio de la Universidad de América) y entes gubernamentales.

A continuación, se describe la metodología que se desarrollara por objetivos en cada fase de la investigación:

2.1. Identificar las características de los residuos de llantas en función de la fuente de generación y el potencial de aprovechamiento en Bogotá D.C.

2.1.1. Definir el área de influencia

Por medio de información secundaria de Secretarías Distritales, la Alcaldía de Bogotá, empresas recolectoras de residuos, entre otros, se proporciona información del área de influencia, dentro de los aspectos para tener en cuenta está la generación de residuos sólidos en la ciudad, donde se especifica el tipo de residuo y su cantidad aproximada, seguido por los residuos de llantas y los impactos ambientales que este residuo genera en la ciudad.

2.1.2. Identificar el parque automotor

Con el fin de determinar estadísticamente el potencial del parque automotor que transita en la ciudad y los tipos de vehículos, se realiza búsqueda en entidades distritales como la Secretaría Distrital de Ambiente, Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Secretaría de Movilidad, Alcaldía de Bogotá, entre otras entidades.

Se consolida tabla con la cantidad de automotores especificando su tipo, cantidad, número de llantas y las llantas totales que se movilizan en la ciudad.

2.1.3. Evidenciar los desechos mediante los programas de posconsumo

En la Secretaría Distrital de Ambiente se desarrollan programas de posconsumo para la adecuada gestión de los residuos de llantas usadas, como lo es el programa posconsumo rueda verde y “llantatón”, los cuales proporcionan estadísticas de recolección de este residuo e identificación del estado de estos, a su vez se enlistan los procesos de manejo, reutilización y aprovechamiento de las llantas mediante estos programas.

2.1.4. Consolidación de la información recolectada

Durante las tres fases iniciales del objetivo a cumplir se recopila información base, esta será consolidada en una matriz, identificando las principales características de las llantas. Se tendrán en cuenta los parámetros para determinar el proceso de valorización adecuado.

Esta información es recopilada de artículos científicos, empresas fabricantes de llantas, revistas científicas y revistas de vehículos.

2.2. Analizar comparativamente los procesos de valorización de los residuos sólidos de llantas

2.2.1. Identificar los procesos de valorización

Se realiza investigación por medio de artículos de revista, libros, referencias de investigación, entre otros medios, acerca de los procesos de valorización que más se usan y que se tienen presentes en la ciudad de Bogotá D.C.

Se tienen en cuenta las siguientes palabras claves, con el fin de obtener mayor información de cada uno de los procesos de valorización, “tire valuation”, “tire waste”, “Waste-to-value”, “Remanufacturing”, también es fundamental conocer la composición de las llantas para una mayor eficiencia de la valorización y por último la aplicabilidad de estos procesos donde se pudo evidenciar que tienen un amplio campo de aplicación, el cual puede ser parte fundamental para los procesos de otras industrias en general.

2.2.2. Comparación y selección de los procesos de valorización

Según la información recolectada frente a los procesos de valorización de las llantas se realiza identificación de ventajas y desventajas de cada uno de los procesos, teniendo en cuenta principalmente aspectos económicos, sociales y ambientales, lo cual son parámetros que comprenden la sostenibilidad ambiental y está enfocado el presente proyecto.

Se consolida información relevante de los artículos de revista, autores expertos en el tema, libros, Google académico, entre otros medios de información que aporte a la investigación, con el fin de obtener información robusta para las demás fases de la investigación y la toma de decisiones.

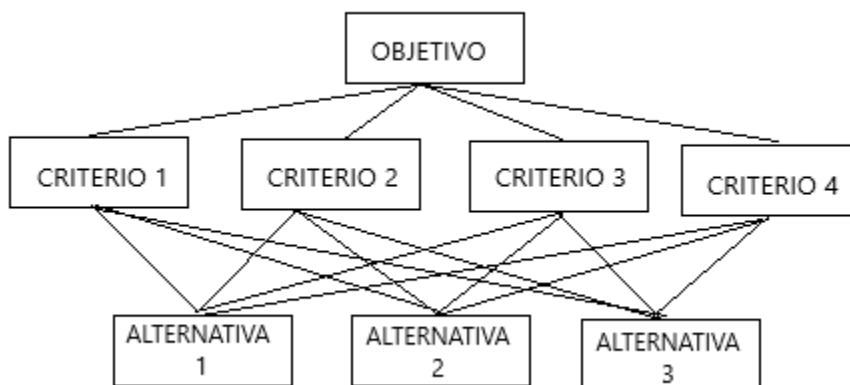
Posteriormente se realiza la escogencia del proceso más adecuado que cumpla con parámetros de sostenibilidad, esto mediante el Modelo AHP o Proceso analítico jerárquico creado por el científico Thomas L. Saaty en el año 1980, es una técnica utilizada para la toma de decisiones. Se basa en desglosar las decisiones en función de una prioridad o jerarquía, lo que ayuda a visualizar cuáles son las decisiones que tienen un mayor impacto en el objetivo buscado (Toskano Gerard, 2020).

Este modelo será aplicado en el software Superdecisions creado por Creative Decisions Foundation en 1996 el cual se basa en el modelo AHP, proporciona todas las herramientas para la toma de decisiones en donde se puede ingresar los juicios que el investigador cree convenientes, la toma de decisión mediante los resultados obtenidos y facilitar el análisis de sensibilidad sobre dichos resultados, en la figura 5 se puede evidenciar una representación del modelo (Superdecisions, 2005). Este software analiza diferentes variables clave, entre ellas se encuentran:

- Meta u objetivo: el cual es la idea principal del proceso de decisión.
- Criterios: son factores que se usan para evaluar cada una de las alternativas planteadas.
- Alternativas: las opciones o soluciones que se están considerando.
- Comparaciones por pares: se realiza una evaluación relativa entre pares teniendo en cuenta alternativas, criterios y subcriterios si se tienen planteados.
- Prioridades: los resultados obtenidos de las comparaciones que indican la importancia de cada alternativa.
- Sensibilidad: es el análisis de como cambian las prioridades cuando se cambian las prioridades de los factores de decisión.

Figura 5.

Modelo AHP



Nota. Descripción grafica del Modelo AHP creado por el matemático Saaty en 1980. Tomado de: Vargas, 2010. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Select and Prioritize Projects in a Portfolio. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Select and Prioritize Projects in a Portfolio – Ricardo Viana Vargas (ricardo-vargas.com)

Teniendo claros estos ítems los cuales son necesarios para realizar el modelo AHP, el matemático Saaty en medio de su investigación propone una escala de importancia relativa en donde sugiere valores para realizar la respectiva evaluación del modelo, esta se tendrá en cuenta en el presente proyecto ya que se acomoda a las necesidades.

Tabla 5.

Escala de importancia relativa – Modelo AHP

Escala	Calificación numérica
Muy recomendado	9
De muy fuerte a extremadamente	8
Muy fuertemente preferido	7
De fuertemente a muy fuertemente	6
Fuertemente preferido	5
De moderadamente a fuertemente	4
Moderadamente preferido	3
De igualmente a moderadamente	2
Igualmente, preferido	1

Nota. Escala de importancia relativa que propone el matemático Saaty en su investigación, la cual se tendrá en cuenta. Tomado de: Vargas, 2010. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Select and Prioritize Projects in a Portfolio. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Select and Prioritize Projects in a Portfolio – Ricardo Viana Vargas (ricardo-vargas.com)

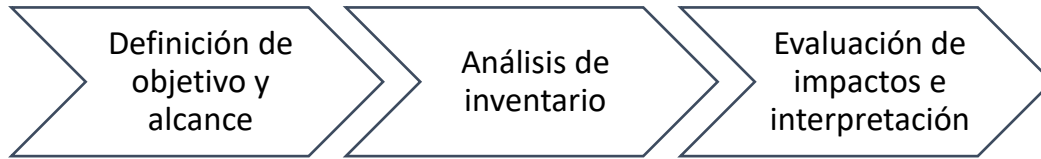
2.3. Determinar la sostenibilidad del proceso de valorización seleccionado mediante la herramienta de análisis de ciclo de vida de los residuos de llantas

2.3.1. Análisis del ciclo de vida

La metodología usada para realizar la evaluación de ciclo de vida (ACV) se estructuró mediante las normas ISO 14040:2006 (ISO 14040:2006 - Environmental Management) e ISO 14044:2006 (ISO 14044:2006 - Environmental Management), se hará uso del software Open LCA 2.0 creado por Green Delta desde 2006, donde su función principal es evaluar ciclo de vida y huella de carbono, permitiendo determinar los impactos ambientales respecto al cambio climático (Hildenbrand et al., 2006), a continuación, en la figura 6 se presentan los pasos que plantea las normas para la ejecución del análisis de ciclo de vida.

Figura 6.

Pasos para ACV



Nota. Pasos para realizar una adecuada ACV, los cuales plantean las normas ISO anteriormente mencionadas.

Dentro de las etapas que se plantean en la norma se tienen las siguientes actividades:

- Definición de objetivo y alcance: Se permite dar una idea clara sobre el caso de estudio. En este caso se espera obtener un análisis detallado del ciclo de vida de la pirolisis de neumáticos, con el fin de determinar su sostenibilidad en la aplicación de valorización del residuo.
- Establecimiento de los límites del estudio: Se determinan las etapas que se van a tener en cuenta para el ciclo de vida de los residuos. Se tiene en cuenta el transporte de las llantas usadas a la planta de proceso, la trituración mecánica del residuo y por último el proceso de pirolisis.
- Determinación de la unidad funcional: El cual es el producto o servicio que se va a evaluar. Para este estudio se tiene en cuenta una valorización de 1t o 1000kg de llantas usadas.
- Integración del inventario: Proceso para el tratamiento de las llantas usadas teniendo en cuenta maquinaria y recursos empleados, información recolectada de bases de datos que aportan al análisis de ciclo de vida (ACV) de un producto, como lo es Sphera y Ecoinvent.
- Evaluación del impacto de ciclo de vida: Método usado para realizar el ACV. Se empleo el software OpenLCA versión 2.2, usando la información recolectada en artículos de revista.

- Interpretación de resultados: Se realiza análisis de cada una de las categorías de impacto seleccionadas para el proceso.

Según el enfoque de fin de vida útil de las llantas, se consideran también los impactos ambientales derivados de cada una de las fases después de fin de vida útil, dentro de ellas se tiene la recolección y el transporte de las llantas usadas, el proceso de pretratamiento que en este caso es la trituración mecánica y el tratamiento seleccionado para la valorización de este residuo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos trazados.

3.1. Identificación de las características de los residuos de llantas en función de la fuente de generación y el potencial de aprovechamiento en la ciudad de Bogotá D.C.

3.1.1. Área de influencia

Bogotá cuenta con 20 localidades y más de 7 millones de habitantes (DANE, 2021), está ubicada en la región que es conocida como la sabana de Bogotá, ya que cuenta con reservas naturales que actúan como sistemas naturales de filtración y depuración del agua, es la tercera capital más alta del mundo después de la Paz y Quito, a 2625 metros sobre el nivel del mar, su extensión es de aproximadamente 33 kilómetros de norte a sur y de 16 kilómetros de occidente a oriente (DANE, 2019), en la figura 7 se presenta la ubicación geográfica de la ciudad de Bogotá.

Figura 7.

Ubicación de Bogotá



Nota. Ubicación de la ciudad de Bogotá en el mapa geográfico. Tomado de: Google Maps. (2024). <https://www.google.com/maps/place/Bogot%C3%A1/@4.6482975,-74.107807,11z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x8e3f9bfd2da6cb29:0x239d635520a33914!8m2!3d4.7109886!4d-74.072092!16zL20vMDFkenlj?entry=ttu>

Según el Observatorio Ambiental de Bogotá (2022) se generan aproximadamente 15.265.139 toneladas/año de residuos sólidos, los cuales se gestionan a través de programas o sistemas integrales, que se enfocan en la gestión y aprovechamiento de estos, dentro de los residuos obtenidos a diario en la ciudad se encuentran RCD (residuos de construcción y demolición), RAEE (residuos de aparatos eléctricos y electrónicos), AVU (aceite de cocina usado o vegetal), llantas, lodos, residuos orgánicos y RESPEL (residuos peligrosos), donde son administrados o gestionados por empresas de servicio público y empresas particulares, que estén acreditadas por la secretaría y auditadas por la misma, con el fin de minimizar la contaminación de los suelos, el aire y los cuerpos hídricos.

La gestión integral de residuos en Bogotá es el conjunto de acciones que se realizan para prevenir, reducir, aprovechar y disponer adecuadamente los residuos que se generan en la ciudad. El objetivo es minimizar el impacto ambiental y social de los residuos, así como promover la economía circular y la inclusión de los recicladores de oficio.

Para lograr una gestión integral de residuos, Bogotá cuenta con un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) que se articula con el Plan Distrital de Desarrollo y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. El PGIRS incluye programas y proyectos para el manejo de los diferentes tipos de residuos, como los residuos orgánicos, los residuos aprovechables, los residuos de construcción y demolición, los residuos peligrosos, entre otros.

Además, Bogotá tiene un nuevo modelo de aprovechamiento llamado “La basura no es basura”, que busca impulsar la cultura del reciclaje y la reutilización de los residuos, así como implementar nuevas tecnologías de tratamiento y valorización que permitan disminuir el enterramiento de residuos en el relleno sanitario Doña Juana.

Adicional a estos programas de gestión de residuos sólidos en general, se cuenta con protocolos de gestión de llantas usadas en Bogotá, el cual consiste en el conjunto de acciones que se realizan para prevenir, reducir, aprovechar y disponer adecuadamente los residuos de neumáticos que se generan en la ciudad. El objetivo es minimizar el

impacto ambiental y social de los residuos, así como promover la economía circular y la inclusión de los recicladores de oficio.

Según la Secretaría de Ambiente, en 2023 se generaron más de 222.000 llantas usadas que fueron desechadas indebidamente en la vía pública (Castiblanco, 2023). Estas llantas pueden convertirse en focos de contaminación y de reproducción de vectores como el mosquito transmisor del dengue. Por eso, es importante darles una disposición adecuada y un aprovechamiento sostenible.

Existen varias iniciativas que buscan solucionar esta problemática, como la Llantatón, una jornada de recolección de llantas en desuso que se realiza periódicamente en diferentes localidades de la ciudad. En 2023, se recogieron 760 llantas en el primer día de la Llantatón en Bogotá (SDA,2023). Otra estrategia es el programa posconsumo Rueda Verde, que cuenta con más de 40 puntos de recolección fijos donde se pueden entregar las llantas usadas (Suache, 2020). Estas llantas son recicladas y reutilizadas en nuevos productos como asfalto, suelas de zapatos, pisos, entre otros.

3.1.2. Parque automotor de Bogotá D.C

El parque automotor de Bogotá es el conjunto de vehículos que circulan por la capital colombiana. Según el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) (2024), el parque automotor de Bogotá llega a la fecha a 18.082.451 vehículos, de los cuales el 38% son automóviles, el 61% motocicletas y el 1% maquinaria. El parque automotor de Bogotá ha generado problemas de movilidad, contaminación y seguridad vial. Algunas de las medidas que se han implementado para enfrentar estos retos son el pico y placa, el sistema integrado de transporte público, la ampliación de la red de ciclorrutas y la restricción de motos en algunas zonas de la ciudad. Sin embargo, estos esfuerzos aún son insuficientes para garantizar una movilidad sostenible y eficiente en Bogotá.

Con el fin de identificar la generación de residuos de llantas usadas, es necesario conocer el parque automotor de la ciudad, en la tabla 11 se consolida la información recolectada según la Encuesta de Transporte Urbano de Pasajeros (ETUP) (DANE,2023), el balance de cifras del RUNT (2022) y el Concejo de Bogotá (2022), se

identifican las cifras aproximadas de tipo de vehículos y cantidad que se encuentran registrados en la ciudad de Bogotá.

Tabla 6.

Parque automotor de Bogotá

TIPO DE VEHICULO PARTICULAR	NUMERO DE VEHICULOS	NUMERO DE LLANTAS	TOTAL, LLANTAS
Bicicleta	1'800.000	2	3'600.000
Motocicleta	10'937.652	2	21'875.304
Automóvil, camioneta	6'948.593	4	27'794.372
Maquinaria, remolques	196.206	8	1'569.648
PUBLICO			
Transmilenio	15.811	12	189.732
Taxi	54.695	4	218.780
SITP - Alimentador	19.955	6	119.730
TOTAL	19'972.912		55'367.566

Nota. Se presenta la clasificación de vehículos adscritos en la ciudad de Bogotá, su cantidad y el número de llantas que pueden ser un residuo a futuro.

A lo largo de los años se ha evidenciado una reducción en la compra de vehículos, en el año 2021 se adquirieron en total 250.272 vehículos nuevos, en el año 2022 se cerró el año con 262.338 vehículos y en el año 2023 se reportó una reducción en la compra de vehículos nuevos de aproximadamente 29% obteniendo así cifras de 186.222 vehículos nuevos en este año (Fenalco, 2023).

3.1.3. Generación de llantas usadas

Según la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) (2020), las llantas usadas son transportadas a una planta de tratamiento donde se extrae el acero y se granula el caucho, que luego se usan para diferentes fines, como la construcción de vías o el combustible para cementeras.

Dentro de la disposición del residuo se realizan los siguientes pasos para adecuar el residuo y poder ser dispuesto, se seleccionan las llantas por su tamaño, se parten, se trozan, se retira el alambre de su estructura, se trituran y por último son llevados al

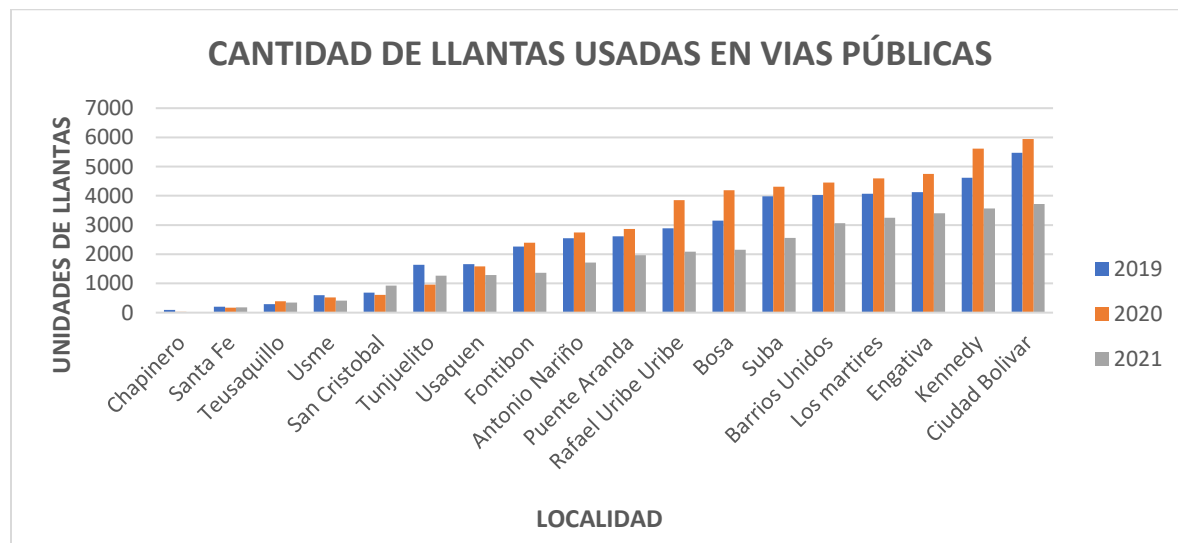
proceso de valorización deseado como lo son los hornos certificados para darles ese segundo uso en donde se puede obtener combustibles, insumos para nuevos productos, entre otros.

Según estadísticas de recolección de la Secretaría Distrital de Ambiente y UAESP, se tiene un valor estimado de cada una de las localidades en la ciudad de Bogotá, esto ayuda a abrir un poco más el panorama frente a la generación y mala disposición de este residuo, sin dejar a un lado la poca educación ambiental de los ciudadanos.

A partir de la información recolectada por las entidades distritales, se identifica que en las localidades Barrios Unidos, Los Mártires, Engativá, Kennedy y Ciudad Bolívar es donde más se observa residuos de llantas usadas en las vías públicas en la figura 8 se muestra el número de llantas recolectadas por localidad, allí se encontraron llantas de todo tipo de vehículo, desde bicicleta hasta automóviles y sus derivados.

Figura 8.

Cantidad de llantas usadas recolectadas en vías públicas



Nota. Se evidencia las unidades de llantas que se recolectaron por año en cada localidad de la ciudad de Bogotá.

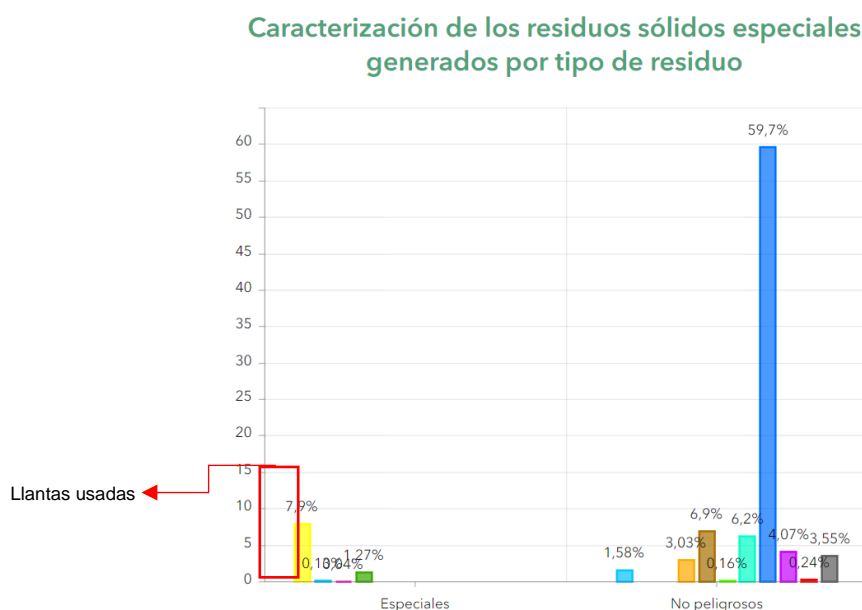
Durante el año 2020 se observa un incremento de generación de llantas usadas recolectadas en las vías públicas, según FENALCO (2023) en el año 2020 se disminuyó la compra de vehículos nuevos en un 28%, teniendo en cuenta las cifras del año 2019.

En el año 2021 se evidencia el incremento de compra de vehículos nuevos respecto al año 2020, sin embargo, la recolección durante este año fue la más baja, teniendo en cuenta que una llanta se desgasta y se realiza el cambio cada 4 a 6 años, según el modo de conducción, es decir que entre más fricción tenga la llanta con el asfalto más se va a desgastar, su velocidad es un factor fundamental para el desgaste y el estado de las vías donde transita el vehículo.

Además de las características de desgaste de la llanta, los consumidores no tienen el conocimiento acerca de la gestión del residuo y en su momento los carros recolectores de basura pública no se hacían cargo de la recolección, por ende, preferían dejarlas en los parques, calles, humedales, entre otros espacios públicos sin saber el grado de contaminación que estaban generando, como se evidencia en la figura 9 la generación de residuos especiales y no peligrosos a nivel local.

Figura 9.

Caracterización de residuos sólidos especiales y RCD



Nota. Grafica donde se evidencia los porcentajes de generación de los residuos especiales y no peligrosos de RCD. Tomado de: UAESP, 2022. Resultados del plan de gestión integral de residuos sólidos. <https://www.uaesp.gov.co/content/geovisor-pgirs>

Por otro lado, este residuo es clasificado como residuo sólido especial y son incluidos dentro de las estadísticas de generación de residuos de construcción y demolición (RCD), de la UAESP en su PGIR, donde se evidencia una generación de 1.395.161 toneladas/mes de RCD, de los cuales el 7.9% de estos son llantas usadas, el cual es el segundo residuo mayor generado seguido de los residuos pétreos.

Adicional a este tipo de recolección, en la ciudad cuentan con centros de acopio y almacenamiento, así como también gestores de llantas usadas, que deben cumplir con la normatividad legal vigente, estos deben diligenciar un reporte mensual de recolección de llantas en la Secretaría Distrital de Ambiente, con el fin de llevar control y estadísticas acerca de este residuo. Actualmente se encuentran 92 centros debidamente inscritos y habilitados ante las entidades competentes.

Estos programas de posconsumo se han hecho más visibles a lo largo de su trayectoria, haciendo que la ciudadanía tome mayor conciencia acerca de los riesgos medio ambientales que generan estos residuos, en lo que llevan estos programas se han recolectado 23.240.180 llantas de automóviles que se caracterizan por su rin de 13" a 22.5", 1.455.022 llantas de bicicletas y motos y 70.687 llantas de vehículos fuera de carretera (Rueda verde, 2023).

Dentro de los programas mencionados las llantas recolectadas son entregadas a un gestor que esté autorizado para la valorización del producto, recuperando así materiales que pueden ser útiles para la fabricación de otros productos, los materiales que más se adquieren son textiles, alambre y caucho, que como se mencionó anteriormente tienen diferentes aplicaciones en las industrias.

Bridgestone es una empresa que se dedica a la fabricación de llantas para diferentes tipos de vehículos, actualmente realiza campañas de recolección de estos residuos en México, Costa Rica y Colombia, donde se recolectaron más de 220 toneladas métricas de llantas usadas en el año 2023 (Corresponsables, 2023).

3.1.4. Gestión de llantas usadas en Bogotá D.C.

En la ciudad de Bogotá se evidencia una gran cantidad de generación residuos de llantas usadas, las cuales no se tiene una disposición final adecuada que ayude a

mitigar la contaminación ambiental que estos generan. Al año se desechan aproximadamente 110.000 toneladas de llantas usadas (Unidad administrativa especial de servicios públicos UAESP, 2022), a pesar de que se cuenta con gestores autorizados para el procesamiento y disposición de este tipo de residuos, no se alcanza a recolectar el suficiente residuo para mitigar su contaminación.

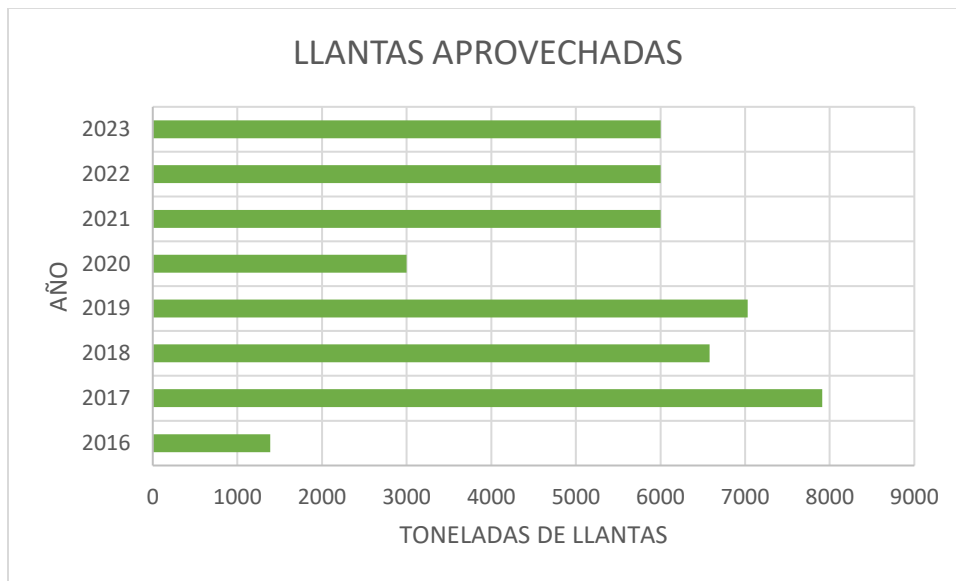
El aprovechamiento de llantas usadas es el proceso mediante el cual se reciclan y reutilizan los neumáticos que ya no sirven para su uso original. El objetivo es reducir el impacto ambiental y social de estos residuos, así como generar beneficios económicos y productivos. Algunos de los productos que se pueden obtener a partir de las llantas usadas son: asfalto, suelas de zapatos, pisos, aislantes, muebles, artesanías, entre otros.

En Bogotá, existen varias iniciativas para el manejo adecuado de las llantas usadas, como “Llantatón”, el programa Rueda Verde y el nuevo modelo de aprovechamiento “La basura no es basura”. Estas estrategias buscan promover la cultura del reciclaje, la economía circular y la inclusión de los recicladores de oficio.

Para reciclar las llantas usadas, se debe acudir a alguno de los 92 puntos de recolección que existen en la ciudad, donde se reciben gratuitamente las llantas de cualquier tamaño y tipo. También se pueden consultar las jornadas de recolección que organiza la empresa Rueda Verde, en la figura 10 se muestra el aprovechamiento de las llantas a lo largo de los años.

Figura 10.

Cantidad de llantas aprovechadas por año



Nota. Grafica donde se observa la cantidad de llantas que han sido aprovechadas y dispuestas a procesos de fabricación de otros productos en la ciudad de Bogotá. Tomado de: Observatorio ambiental de Bogotá, 2023. Llantas usadas aprovechadas en el distrito capital LLUA. <https://oab.ambientebogota.gov.co/llantas-usadas-aprovechadas-en-el-distrito-capital/#info>

Bogotá cuenta con programas de posconsumo lo cual se busca promover la gestión adecuada de los residuos de llantas, dentro de estos programas esta rueda y sistema verdes lo cual generan convenios con fabricantes e importadores de llantas ya que estos concentran el 90% de los neumáticos que se disponen al mercado (Bogotá, 2022).

Estos están encargados de la recolección de los residuos, donde uno de los beneficios es que no se cobra por dicho servicio ya que están regulados por normativas, así mismo tienen puntos fijos de recolección en toda la ciudad para el conocimiento de los habitantes. Por otro lado, los recicladores, acopiadores y demás gestores de estos residuos se deben registrar dando cumplimiento a obligaciones del ministerio de ambiente.

Por otro lado, Alejandro Gómez, subdirector de ecourbanismo y gestión ambiental de la Secretaría Distrital de Ambiente (2022) explica los procesos que se llevan a cabo para el reciclaje de las llantas, donde especifica que la mayor cantidad de llantas que se recolectan son usadas para generación de energía en la fabricación de cemento y parte de combustible para el mismo fin, también son trituradas para la adecuación de canchas sintéticas promoviendo así la práctica deportiva en la ciudad.

Se cuenta con convenios con empresas fabricantes de asfalto lo cual se adiciona parte de esta llanta triturada para fortalecerlo, cuando se dispone para capas de reparación de vías o re parcheo, por último, se realizan trabajos artesanales con estos residuos como lo es la fabricación de materas para adornar parques, sin embargo, esta actividad es poco vista ya que no se cuenta con la educación ambiental y puede promover la afectación del suelo.

3.1.5. Caracterización de las llantas

La caracterización de las llantas basándose en los procesos de valorización, se debe tener en cuenta sus propiedades químicas y físicas con el fin de determinar cómo se pueden reutilizar, reciclar o convertir en nuevos productos u otro uso al que aplique. Se realiza una breve descripción de los principales procesos de valorización y como algunas propiedades de las llantas pueden influir en cada uno.

- Valorización material: el cual se centra en la recuperación de materiales de las llantas, en donde se pueden desarrollar procesos adecuados como lo es el reciclaje mecánico el cual implica la trituración de las llantas para obtener granulado de caucho o polvo de caucho, donde puede ser utilizado en otros productos como suelos de parques, pistas deportivas, asfalto, entre otros, para este proceso es importante tener en cuenta la composición química del caucho para determinar la calidad del granulado, las propiedades físicas el cual afecta el rendimiento del material reciclado y los contaminantes los cuales deben ser eliminados antes de reciclar, por otro lado se encuentra el proceso de separación de acero y textiles donde se evidencia que el acero es altamente reciclable y las fibras textiles pueden ser usadas para industrias textiles o rellenos, se debe tener en cuenta la composición del acero y las propiedades de las fibras textiles.

- Valorización energética: las llantas son usadas como fuente de energía, aprovechando su alto poder calorífico debido a su contenido de hidrocarburos, algunos de los procesos de valorización energética es la pirólisis en donde se debe tener en cuenta su composición química, contenido de azufre influyendo en la calidad de los aceites pirolíticos, y la temperatura de degradación térmica, por otro lado se encuentra la incineración o co-procesamiento en cementeras aprovechando su poder calorífico para generar energía, aquí se debe tener en cuenta el poder calorífico y las emisiones de gases tóxicos
- Valorización química: la llanta es sometida a procesos químicos para recuperar los compuestos químicos que se encuentran en ella, se puede encontrar la desvulcanización donde se rompen los enlaces de azufre para obtener caucho más maleable, se debe tener en cuenta la estructura del caucho vulcanizado y la pureza del caucho
- Reutilización directa: las llantas usadas se reencauchan para ser reutilizadas, los procesos más usados son la inspección estructural examinando la llanta teniendo en cuenta la resistencia a la tracción y el desgaste.

Con el fin de determinar las propiedades más relevantes de las llantas, se consolida una matriz (tabla 7), en donde se tienen en cuenta las propiedades químicas y físicas con su respectiva descripción.

Tabla 7.

Caracterización de las llantas

PROPIEDADES QUÍMICAS	
PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
Composición química del caucho	Caucho natural: polímero basado en isopropeno (C_5H_8), aportando elasticidad Caucho sintético: Butadieno, neopreno, estireno-butadieno, mejora resistencia y durabilidad (Ministerio de fomento et al., 2023)
Contenido de azufre	Proceso químico en donde se adiciona azufre o peróxidos, haciéndola más resistente al desgaste y al calor (Flores Moreno et al., 2010)
Aditivos	Aceleradores y antioxidantes: oxido de zinc, negro de carbón, aceites, resinas y otros antioxidantes, mejora la resistencia del caucho a la oxidación y el desgaste Negro de carbono: refuerza el caucho aportando durabilidad

	Aceleradores de vulcanización: óxido de zinc y tiuramas (Flores Moreno et al., 2010)
Resistencia química	Presentan buena resistencia química frente a ácidos diluidos, bases y algunos solventes, sin embargo, son afectados por solventes orgánicos fuertes como aceites, grasas y algunos hidrocarburos (Flores Moreno et al., 2010)
Componentes metálicos y textiles	Refuerzos metálicos como alambre de acero recubiertos con bronce para mejorar la adhesión con el caucho y evitar corrosión Refuerzos textiles como poliéster o nylon polímeros de alta resistencia dando estabilidad y rigidez (Ministerio de fomento et al., 2023)
Emisiones en procesos térmicos	Liberación de gases como hidrocarburos volátiles, monóxido de carbono, dióxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles (Flores Moreno et al., 2010)
PROPIEDADES FÍSICAS	
PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
Elasticidad	Permite absorber impactos y volver a su forma original sin deformarse permanentemente (Flores Moreno et al., 2010)
Resistencia al desgaste	Se debe al uso de negro de carbono y otros aditivos que refuerzan la superficie del caucho (Flores Moreno et al., 2010)
Dureza	Ofrece un equilibrio entre flexibilidad y resistencia, se mide en escala Shore A usada para medir la dureza de materiales, valorado entre 60 y 70 Shore A (Ministerio de fomento et al., 2023)
Resistencia a la tracción	El caucho junto con los refuerzos de acero y textiles proporcionan una alta resistencia a la tracción, esta suele estar entre 15 y 25 MPa, dependiendo del tipo de llanta (Ministerio de fomento et al., 2023)
Resistencia a la temperatura	El caucho vulcanizado y los aditivos como el negro de carbono y los aceites ayudan a las llantas mantener su rendimiento a la temperatura, pueden ser tan bajas como -30°C y altas como 100°C (Ministerio de fomento et al., 2023)
Temperatura de degradación térmica	Inicio de degradación a partir de 200°C y 300°C, degradación del caucho 300°C y 400°C, degradación completa en pirólisis 400°C y 700°C, gasificación 800°C y 1200°C e incineración superior a 850°C (Flores Moreno et al., 2010)
Densidad	La densidad promedio de las llantas es de 1,1 a 1,2 g/cm ³ , la baja densidad del caucho permite que la llanta sea relativamente liviana (Ministerio de fomento et al., 2023)
Resistencia al impacto	Capacidad de absorber impactos debido a su estructura elástica y flexible (Flores Moreno et al., 2010)
Resistencia a la compresión	La estructura de las llantas junto con sus refuerzos puede soportar estas fuerzas sin colapsar o deformarse, también está relacionado con la presión de inflado adecuada (Flores Moreno et al., 2010)

Impermeabilidad	Son impermeables al aire y a los líquidos, permitiendo mantener la presión interna (Flores Moreno et al., 2010)
Resistencia al desgarramiento	Capacidad de soportar la propagación de grietas o cortes bajo cargas mecánicas, sus refuerzos en la carcasa ayudan a distribuir las fuerzas (Flores Moreno et al., 2010)
Capacidad de carga	Las llantas de automóviles suelen tener una capacidad de carga típica entre 500 y 1500 kg por llanta, esto depende de su clasificación
Poder calorífico	Varía según su composición y el tipo de caucho utilizado, en general se estima que el poder calorífico superior está entre 25 y 30 MJ/kg y el poder calorífico inferior entre 21 y 25 MJ/kg (Ministerio de fomento et al., 2023)

Nota. Propiedades de las llantas para determinar su aplicación en procesos de valorización y reducción de contaminación.

Se resalta la importancia de tener una adecuada caracterización de las llantas, con el fin de determinar el proceso óptimo para su valorización, dependiendo de las condiciones y maquinaria que se tengan disponibles y la eficacia de los mismos, teniendo una adecuada caracterización contribuye a la reducción de los impactos ambientales que generan este tipo de residuos, aporta parámetros esenciales para la toma de decisiones, se recuperan materiales que aportan a diversos procesos de producción, apunta a una gestión de residuos más sostenible y una iniciativa para la economía circular.

3.2. Análisis comparativo de los procesos de valorización de los residuos sólidos de llantas

3.2.1. Identificación de los procesos de valorización

Es fundamental conocer los procesos de valorización de llantas con el fin de reducir su impacto ambiental y aprovechar sus materiales de manera sostenible. Principalmente se debe tener en cuenta la fabricación de las llantas proceso que se realiza por medio de una mezcla de caucho, sílice, hule natural y sintético, negro de humo, antioxidantes, aceites y grasas, entre otros componentes.

El proceso de fabricación de llantas incluye la construcción de la banda de rodadura, los cinturones de acero, la carcasa de acero, la capa de butilo, el talón y la pared lateral, para integrar todas las piezas se realiza por medio de la vulcanización, donde se aplican calor y presión para formar la llanta final (Firestone, 2022).

Después de obtener la llanta y hacer uso de ella hasta terminar su vida útil esta es desechada, aquí es donde se inicia el reciclaje de llantas lo cual implica varios procesos que hacen que se gestione adecuadamente, como lo es la trituración, reutilización o reencauche, reciclaje donde mayormente se usa para la fabricación de asfalto y canchas deportivas, entre otros métodos de uso (Pima, 2023) y valorización energética lo cual se usa en procesos industriales principalmente en la fabricación de cemento (Ramírez Laura, 2022), a nivel mundial también se está trabajando en la valorización de residuos de llantas aportando a la ciencia una mejoría en el impacto ambiental que las llantas generan, en la tabla 8 se representa en algunos países su regeneración y valorización.

Tabla 8.

Generación y valorización de residuos de neumáticos a nivel mundial

País	Residuos anuales de neumáticos (millones de t)	Peso recuperado (millones de t)	Valorización energética (millones de t)	Recuperación de materiales (millones de t)
India	440	431,2	94,86	310,46
Japón	140	119	94,01	
EE. UU.	546,8		475,72	
China	1609,2	852,88		
Argentina, Arabia Saudita, Malasia, Tailandia	80	Despreciable		
UE	500	455	154,7	241,15

Nota. Se relacionan los países que más desechan neumáticos y así mismo su gestión para reducir la contaminación que estos generan, en Japón por medio de la recuperación energética se usa para la industria del papel y hornos de cemento y en EE. UU. la usan para los hornos cementeros, eso sirve de referencia para identificar los procesos de valorización más usados y eficientes. Abdullah (2024)

Actualmente en la ciudad de Bogotá se realizan procesos de valorización de los residuos que aportan beneficios al medio ambiente, mejora en la economía circular,

reduce la generación de residuos sólidos, entre otros beneficios (Ministerio de Ambiente, 2021).

Se debe tener en cuenta que para realizar el proceso de valorización de las llantas el primer paso es la trituración de esta, con el fin de poder ser incorporada al proceso. Se tienen 4 tipos de trituración el primero y el más usado es la trituración mecánica el cual consiste en el uso de trituradoras, molinos, granuladores de cuchillas, entre otros, donde se obtiene granos de no mayor a 0.3mm como se muestra en la figura 11, el segundo método es criogénico el cual hacen uso de nitrógeno líquido (-80°C) con el fin de congelar el neumático para así ser enviado a los molinos obteniendo granos de hasta 75µm, el tercer método es por medio de la molienda húmeda por medio de una suspensión acuosa donde es importante aclarar que el neumático debe ser previamente triturado y por último la trituración con alta presión de agua en donde aplica mayormente para triturar neumáticos de gran tamaño y resistencia, se usan presiones superiores a los 2000 bares (Abdullah, 2024).

Figura 11.

Proceso de trituración mecánica de llantas



Nota. Pasos de trituración mecánica el cual es el método más usado y económico para lograr incorporar las llantas usadas a otros procesos como materias primas o realizar esa gestión adecuada del desecho (Azunna et al., 2024)

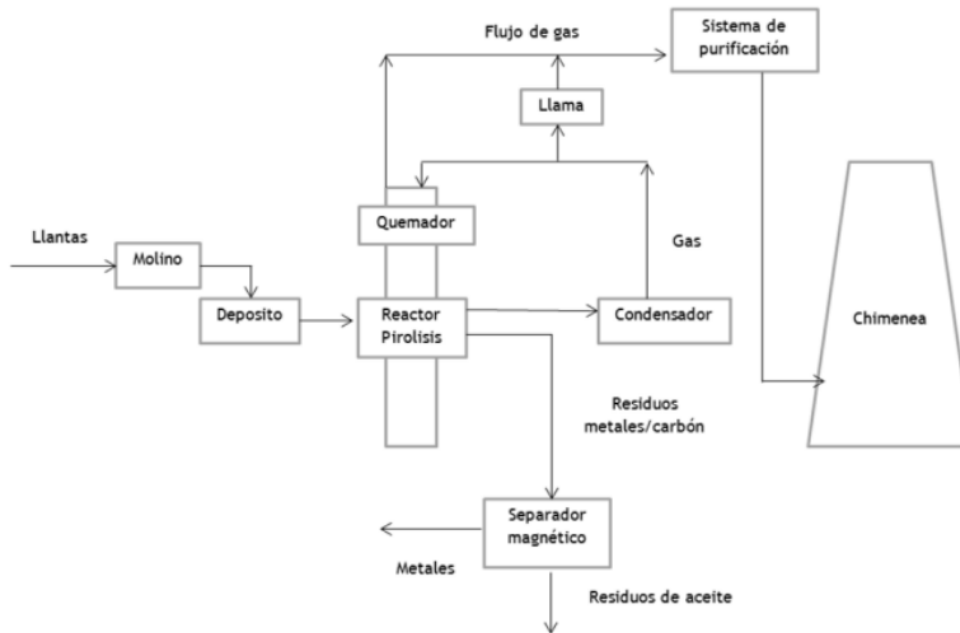
A continuación, se describen los procesos de valorización de los residuos sólidos de llantas más usados en Bogotá y municipios aledaños.

- **Pirólisis**

La pirólisis se realiza en una atmosfera anaeróbica, donde es notoria el uso de gases inertes como N₂, CO₂, He, Ar, entre otros, y a altas temperaturas, presión y dependiendo del tamaño de partículas, se puede generar residuos sólidos, líquidos y gaseosos, que pueden ser usados de diferentes maneras donde la más usada es la generación de energía y calor, en la figura 12 se aclara el procedimiento mediante un diagrama de proceso.

Figura 12.

Diagrama de proceso de pirólisis



Nota. Diagrama de una planta de pirólisis con el recorrido de los productos dentro del proceso. Fuente: Ospina & Villada, (2011). Métodos para caracterizar combustibles líquidos y gaseosos obtenidos de llantas en uso a través de las normas ASTM.

Existen variables que definen el proceso de pirólisis las cuales definen el rendimiento de esta, entre ellos está la temperatura la cual es la más importante debido a que determina la cantidad de energía que se usa para la ruptura de las moléculas de las llantas, haciendo efecto a partir de los 350 °C, siendo más eficiente a los 450 °C a 700 °C (Williams, 2013). Otra variable importante es la presión, se puede decir de esta que

a mayor presión se hace más difícil la volatilización de los componentes siendo necesaria más o menos una presión de 12Kpa (Buekens, 2006).

El efecto del tamaño de la llanta sobre el proceso también incide mucho en la pirólisis, teniendo en cuenta que mientras más grande sea el tamaño menor va a ser la temperatura interior de la misma haciendo que se reduzca la velocidad del proceso, otra variable importante es la velocidad de calentamiento lo cual hace referencia a la velocidad de reacción y así mismo determina el perfil de temperatura de las partículas de la llanta, queriendo decir que a mayores velocidades de calentamiento se incrementa la cantidad de volátiles liberados (Angarita, 2019) y por último el efecto del tiempo de residencia, ya que al tener un mayor tiempo de residencia se obtienen mayores volúmenes de sólidos y también afecta los costos del proceso.

Los productos obtenidos como bien se mencionó anteriormente incluyen aceite de pirólisis, pirocarbón (negro de humo) y pirogas, el cual se ha evidenciado que han sido usados directamente como combustible industrial o en otras ocasiones para producir hidrogeno, también han sido usados como combustible alternativo de motores de combustión, la pirolisis produce aproximadamente un 70% de combustible. 5% de gas, 20% de residuos sólidos y 5% de metal (Abdullah, 2024).

- **Reciclaje mecánico**

El proceso de reciclaje de las llantas principalmente consiste en la trituración del material y posteriormente ser reutilizado en los procesos productivos de otros materiales, como por ejemplo se puede reusar el caucho, acero y fibras textiles que se recolectan del proceso de trituración.

El caucho recolectado el cual es el producto principal se puede usar como materia prima de otros productos a base de caucho o puede ser incorporado en varios materiales de construcción aprovechando su alta elasticidad, el acero también puede ser usado en la fabricación de otros productos que sea necesario su uso y las fibras textiles normalmente se incineran con el fin de generar una recuperación energética o puede ser usado como material de refuerzo para conglomerados (Landi et al., 2018).

Este proceso inicia en la recolección de los residuos en donde se garantiza una recolección responsable con el fin de minimizar impactos negativos, posterior a esto se realiza una inspección y clasificación según el estado de las llantas usadas recolectadas, allí se evidencia que tipo de llanta puede ser reencauchada o triturada para su reciclaje, posteriormente se procede a realizar el corte mediante maquinas trituradoras o cizallas industriales, como resultado se obtienen trozos de caucho de entre 2 a 10 mm, según como se requiera.

Posterior a esto se procede a realizar la separación de componentes mediante separación magnética con el fin de retirar el acero y para retirar las fibras textiles se usa un sistema de aspiración o separadores por aire, esto con el propósito de entregar el caucho limpio y separado para su uso, en la figura 13 se representa el proceso.

Dentro de los procesos de reciclaje de llantas se puede encontrar el reencauche, aditivos para el asfalto, canchas deportivas, suelos de parques de niños, la desvulcanización es el proceso que invierte la vulcanización obteniendo así caucho virgen donde se realiza la ruptura selectiva de los enlaces químicos manteniendo su cadena principal carbono-hidrógeno, entre otros posibles procesos de reutilización de las llantas (Dobrotă et al., 2020).

Una de las desventajas que se pueden presentar en este proceso y la más importante es el desgaste de la máquina, una de las causas es debido a la abrasión ya que el contacto de la llanta y las cuchillas va generando un desgaste por fricción, por otro lado se presenta corrosión por los componentes químicos que tiene la llanta y la humedad que esta pueda tener y por último se puede presentar fatiga en la maquinaria ya que el uso continuo y las cargas pueden provocar agotamiento del material, por lo que es importante implementar programas de mantenimiento preventivo y materiales de alta calidad (AGICO CEMENT, 2023).

Figura 13.

Productos de llantas recicladas



Nota. Proceso de trituración mecánica de llantas teniendo en cuenta cada una de las fases contenidas. Tomado de: Made in China, Maquina trituradora de neumáticos en venta. https://es.made-in-china.com/co_hvstgroup/product_Used-Tire-Shredder-Machine-for-Sale_eneuehuuy.html

- **Co-procesamiento**

El co-procesamiento es una técnica de la economía circular que utiliza neumáticos desgastados para producir una fuente de energía alterna. En lugar de desechar las llantas, se les da un nuevo propósito al convertirlas en combustible para procesos industriales.

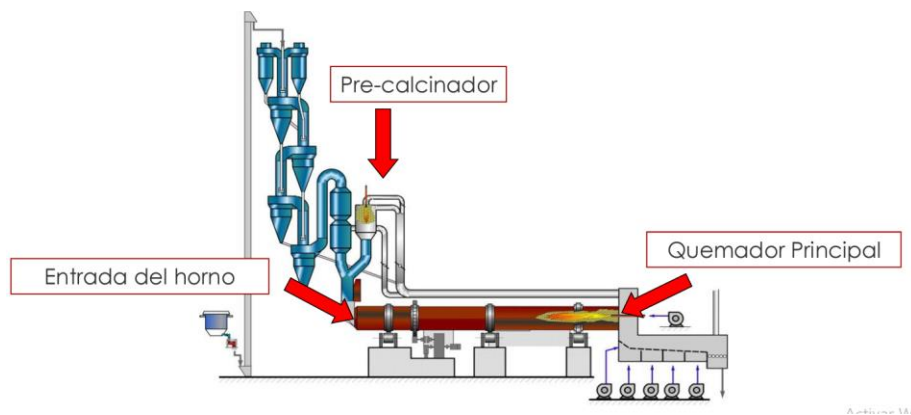
Este proceso se usa principalmente en los hornos cementeros con el fin de usar el poder calorífico de las llantas para la producción de Clinker (Cámara de comercio, 2006), este proceso es debidamente controlado debido a las emisiones que puede aportar al ambiente. En el momento en que termina la quema, quedan residuos de minerales los cuales son incorporados al producto final que es el cemento con el fin de aportar mayores propiedades y poder reutilizar todo el residuo de la llanta.

Las llantas representan un alto contenido de energía de más de 30MJ/kg, también tienen propiedades positivas debido a su bajo grado de modificación y poca humedad, para la fabricación de cemento se necesita un consumo de calor aproximado de 3.3 GJ/t Clinker, lo cual implica el 30% del costo del cemento, la fuente de energía que más se usa para esta fabricación es el carbón el cual para poder fabricar 1000kg de cemento se usa como mínimo 120kg de carbón generando así 27.5MJ/KG, donde se puede evidenciar el alto consumo de carbón para la fabricación del cemento, sin dejar a un lado el consumo de electricidad que requiere el proceso (Abdullah, 2024).

Uno de los requisitos fundamentales para el uso de combustibles alternativos es que deben representar cantidades suficientes para asegurar la optimización del proceso, las propiedades físico-químicas de las cenizas que pueda contener el combustible no intervengan en la calidad el cemento, tener en cuenta la capacidad y diseño de la planta para poder ser implementado y sea resistente, debe contener una baja humedad y por su puesto un alto poder calorífico, entre otras de las propiedades que debe cumplir, en la figura 14 se evidencia el proceso (Abdullah, 2024).

Figura 14.

Co-procesamiento de llantas usadas



Nota. Fábrica de cemento en donde se implementa el co-procesamiento de llantas usadas con el fin de usar su poder calorífico. Tomado de: Jensen, Andres. 2015. Foro internacional valorización energética de residuos urbanos, experiencias y estrategias globales. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://coprocesamiento.org/wp-content/uploads/2019/05/24._Co-procesamiento_en_hornos_cementeros.pdf

Como se pudo evidenciar se realizan diferentes procesos de valorización de llantas usadas en Bogotá, lo cual tiene diferentes beneficios según el área de aplicación que se desee. Dentro de los beneficios de valorización se presenta una reducción de residuos lo cual disminuye la contaminación por la mala disposición, se puede obtener una recuperación de materiales que pueden ser usados como materias primas de otro proceso de productivo, como se demostró en el proceso de reciclaje anteriormente mencionado.

3.2.2. Comparación y selección de los procesos de valorización

Con el fin de identificar qué proceso de valorización es óptimo para analizar su ciclo de vida y aportar nuevas alternativas, se debe identificar criterios que sean relevantes para la toma de decisiones. Mediante el uso del software Superdecisions se analizan cada una de las alternativas.

En la tabla 9 se presenta una comparación de cada uno de los procesos anteriormente identificados teniendo en cuenta las tres ramas fundamentales de la sostenibilidad como los son la económica, social y ambiental.

Tabla 9.

Comparación de los métodos de valorización de llantas

ITEM	PIRÓLISIS	COPROCESAMIENTO	RECICLAJE
ECONÓMICO VENTAJAS	<p>Es un proceso más económico y positivo en comparación con la gasificación (Abdullah, 2024)</p> <p>Aumento de la demanda de uso de las materias primas (Wang et al., 2022)</p> <p>Adquisición de subproductos que pueden ser usados como materias primas, sustitución de agentes contaminantes o mejora de otros procesos (Zerin et al., 2023)</p>	<p>Reduce el consumo de energía eléctrica y recursos naturales para la generación de calor en los hornos cementeros (Yilmaz & Degirmenci, 2009)</p> <p>Mejora la resistencia a la flexión (Fattuhi & Clark, 1996)</p>	<p>Reducción de costos para el tratamiento de los residuos de llantas, según el proceso de trituración que se escoja, siendo el más económico la trituración mecánica (Abdullah, 2024)</p> <p>Recolección de más subproductos que pueden ser usados (Dobrotă et al., 2020)</p>
DESVENTAJAS	<p>Implementación de maquinaria altamente costosa que cumpla con los parámetros mínimos del proceso (Abdullah, 2024)</p>	<p>Para el uso del combustible alternativo en las plantas, dependiendo de sus propiedades cada planta debe tener un diseño optimo y adecuado para la implementación del combustible (Landi et al., 2018)</p> <p>Se ha evidenciado que la incorporación de caucho en la fabricación de cemento reduce la resistencia a la compresión (Yilmaz & Degirmenci, 2009)</p>	<p>El proceso de trituración puede ser costoso según el tamaño de partículas que se requieran para el proceso seleccionado (Abdullah, 2024)</p>

SOCIAL	VENTAJAS	Aumento de empleo mediante la innovación y el desarrollo de nuevas alternativas de investigación (Peña et al., 2019)	Aumento de empleo en las cementeras y aplicación de nuevas tecnologías (Chen et al., 2022)	Aumento de empleo debido a la innovación en la creación de nuevas alternativas de uso de los residuos (Wang et al., 2022)
	DESVENTAJAS	Puede especificar los estudios para la manipulación de la maquinaria (Abdullah, 2024)	La automatización de los procesos puede generar una reducción en el capital humano para la ejecución de este (Zerin et al., 2023)	
AMBIENTAL	VENTAJAS	Reducción de neumáticos de desecho (Wang et al., 2022) Obtención de subproductos que pueden ser incorporados como materias primas (Zerin et al., 2023)	Uso de los neumáticos en los hornos cementeros reduce la acumulación en vertederos, sectores públicos, entre otros (Azunna et al., 2024) Reduce el uso de otros recursos naturales para la generación de energía (Yilmaz & Degirmenci, 2009) No genera tantos residuos al final del proceso de incineración ya que este puede ser incorporado en el cemento (Landi et al., 2018)	Produce menos emisiones contaminantes a la atmosfera (Abdullah, 2024)
	DESVENTAJAS	Mal diseño de la planta pirolítica en donde se pueden presentar fugas de compuestos altamente contaminantes (Zerin et al., 2023)	Diseño de la planta para el monitoreo constante de las emisiones que genera el proceso de incineración (Abdullah, 2024) Generación de cenizas volátiles (Yilmaz & Degirmenci, 2009)	Uso de químicos no biodegradables para la separación de los componentes (Abdullah, 2024)

Nota. Comparación de las ventajas y desventajas de cada uno de los procesos de valorización teniendo en cuenta las tres ramas fundamentales de la sostenibilidad (económico, ambiental y social).

Como se pudo evidenciar en la tabla anterior cada uno de los procesos de valorización seleccionados cuentan con ventajas y desventajas, según su implementación, con respecto al ítem económico la pirólisis es más costosa debido al uso de maquinaria que debe ser especializada para el óptimo funcionamiento del proceso, en segundo lugar está el co-procesamiento ya que este depende de la planta cementera que se tenga disponible para la implementación del proceso de recolección de energía de las llantas y a su vez en la ciudad de Bogotá no se cuenta con un número significativo.

En el ítem social todos los procesos comparten la misma ventaja el cual es el aumento de empleo para las comunidades aledañas y mano de obra experimental, aunque se debe tener en cuenta que en ciertas ocasiones estos procesos pueden ser automatizados el cual el potencial humano sería reducido, y con respecto al ítem ambiental el cual es el que mayor valorización aporta a cada uno de los procesos se evidencia que cada uno cumple con su función de reducir contaminantes, sin embargo la pirólisis debido a la recolección de diversos subproductos pueden ser incorporados en otros procesos de producción o bien sea usados como alternativas de combustible, este proceso es altamente controlado y por ende su impacto ambiental es bajo, sin dejar a un lado el reciclaje de llantas el cual es un proceso que también genera menores emisiones que si lo comparamos con el co-procesamiento, la recolección de residuos que pueden ser usados como materia prima también es fundamental y muy beneficioso.

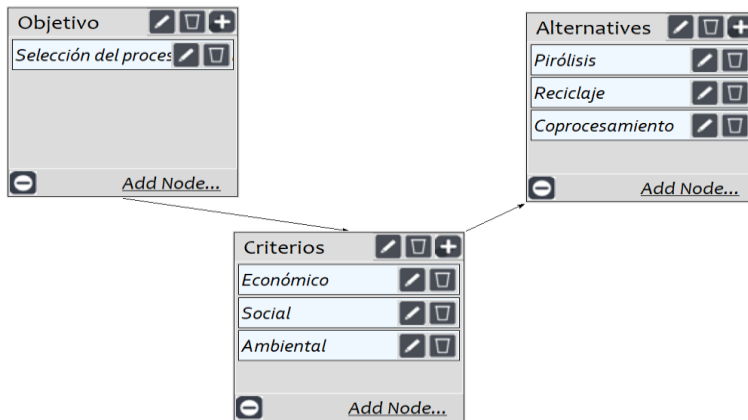
Ahora bien, ya se cuenta con la comparación e identificación de cada uno de los procesos de valorización, posteriormente se procede al uso del software Superdecisions con el fin de seleccionar el proceso más óptimo con el fin de analizar su ciclo de vida e identificar nuevas alternativas para la implementación de este.

En primera instancia se identifica el objetivo el cual es la selección del mejor método de valorización de llantas, los criterios a tener en cuenta son económico, social y ambiental y las alternativas propuestas son pirólisis, reciclaje y co-procesamiento por ende son las que van a quedar en la selección final, estos son los parámetros a tener en cuenta para el software, en donde cada uno de los ítems son llamados clúster donde también se

pueden llamar las ideas principales para la selección, así como se muestra en la figura 15 a continuación, la estructura jerárquica.

Figura 15.

Estructura jerárquica del caso “selección de un proceso de valorización”

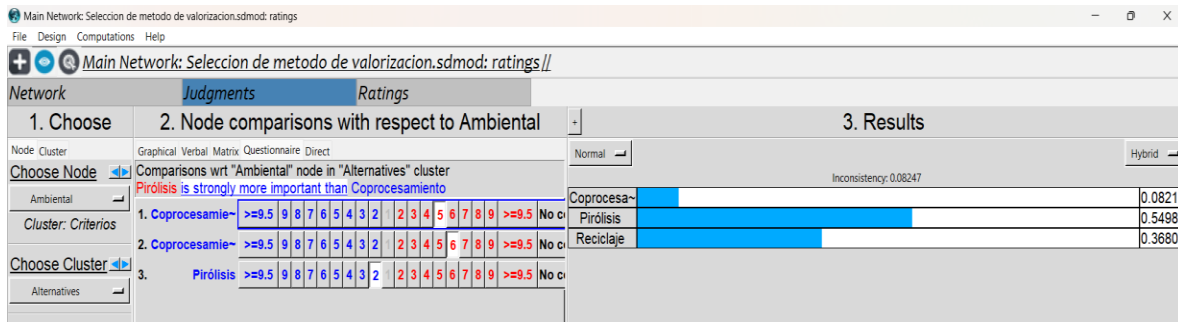


Nota. Identificación de los clúster para tener en cuenta en la toma de decisiones.

Teniendo clara la estructura jerárquica del problema planteado en el software, este a su vez genera los pares que se van a comparar, como lo son objetivo y criterios, criterios y alternativas, para posteriormente calificarse. En la figura 16 se observa la comparación por pares por medio de cuestionario que se aplicó.

Figura 16.

Comparación por pares






Nota. Se califican cada uno de los pares planteados por el software, teniendo en cuenta la escala de evaluación

Como se mencionó anteriormente la escala de evaluación empleada es la propuesta por Saaty, donde comprende números del 1 al 9, los cuales están asociados al grado de importancia de un elemento sobre otro, por ejemplo, el numero 9 indica que una alternativa es extremadamente más importante que la otra, mientras que el numero 1 indica que una alternativa es igualmente importante que la otra.

Dando cumplimiento a la evaluación realizada, se obtienen resultados o prioridades globales de cada una de las alternativas, en la figura 17 se presenta el resultado obtenido con respecto a los criterios evaluados en el software.

Figura 17.

Resultados obtenidos en superdecisions

Name	Graphic	Ideals	Normals	Raw
Coprocesamiento		0.225294	0.105661	0.052831
Pirólisis		1.000000	0.468993	0.234496
Reciclaje		0.906935	0.425346	0.212673

Nota. Selección de la mejor alternativa planteada según el software superdecisions.

Aportando la calificación de cada uno de los clústeres se llega a la conclusión que la pirólisis es la alternativa óptima de aplicación, a pesar de ser la más costosa esta conlleva muchos beneficios tanto ambientales como sociales, dentro de los cuales se puede tener en cuenta la producción de energía limpia, recuperación de materiales esenciales para otros procesos productivos, reducción de emisiones de CO2, contribuye a la economía circular y mejora de la gestión de residuos.

3.3. Determinación de la sostenibilidad del proceso de valorización seleccionado mediante la herramienta de análisis de ciclo de vida de los residuos de llantas

Los resultados obtenidos se presentan teniendo en cuenta el procedimiento anteriormente mencionado, en base a la normatividad vigente para realizar un óptimo análisis de ciclo de vida (ACV).

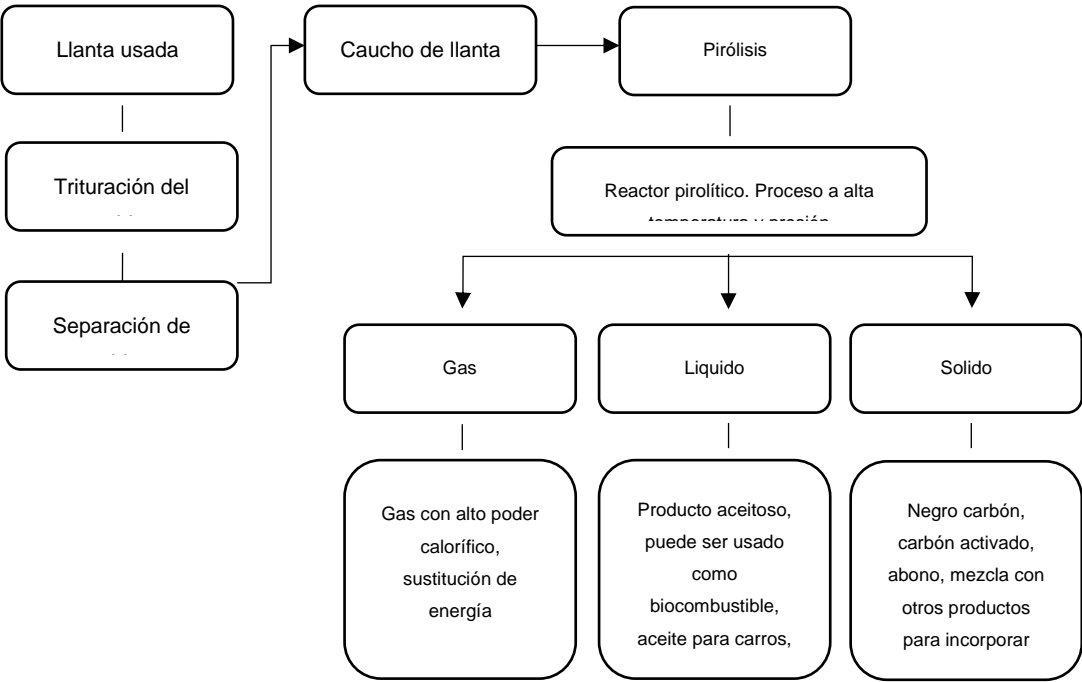
3.3.1. Objetivo y alcance ACV

El objetivo de este estudio es realizar un ACV de las llantas usadas, haciendo un aprovechamiento del residuo partiendo desde su recolección y transporte a la planta, el proceso de trituración para obtener un residuo de tamaño y condiciones adecuadas para ingresar al proceso de valorización y por último el proceso seleccionado anteriormente, el cual es pirólisis, donde se evidencie los impactos y beneficios de su aplicación.

Con el fin de realizar un adecuado ACV se establece su alcance, en donde se excluye la fabricación de la llanta, el proceso de desgaste de esta, la actividad de recolección de la llanta usada y los usos que se le den a los residuos del proceso de valorización, a continuación, se presenta figura 18 en donde se realiza la delimitación del presente proyecto, adicional a esto se analiza la valorización de 1 tonelada o 1000 kilogramos diario de llantas usadas.

Figura 18.

Alcance del ACV



Nota. Se representa el alcance que se tiene en cuenta para la ejecución del ACV, el área sombreada con rojo representa los límites del presente estudio.

3.3.2. Análisis de inventario

Se identifica cada una de las etapas en el proceso de valorización tenidas en cuenta para realizar el balance de masa describiendo las entradas de energía y materiales y a su vez las emisiones de salida, para así lograr realizar el análisis del proceso en el software seleccionado OpenLCA.

3.3.2.a. Trituración mecánica. Su principal función es la trituración y alistamiento de la llanta usada a través de maquinaria especializada para el proceso llamada triturador, su funcionamiento es a base de energía eléctrica.

Para realizar el ACV se tuvo en cuenta los balances de masa y energía propuestos en el artículo “A comparative life cycle assessment of tyre recycling using pyrolysis compared to conventional end-of-life pathways” (Malijonyte et al., 2016), tanto para el proceso de trituración mecánica de las llantas como el proceso de pirólisis, se plantea para el tratamiento de 1 tonelada o 1000 kilogramos diario de llantas usadas.

Los datos recopilados en esta referencia son obtenidos de diferentes bases de datos como lo es Managed LCA Content de Sphera (*Corporate Sustainability Software | Sphera*, n.d.)y Ecoinvent (*Base de Datos - Ecoinvent*, n.d.), en la tabla 10 se presenta balance de masa.

Tabla 10.

Balance de masa proceso de trituración de llantas

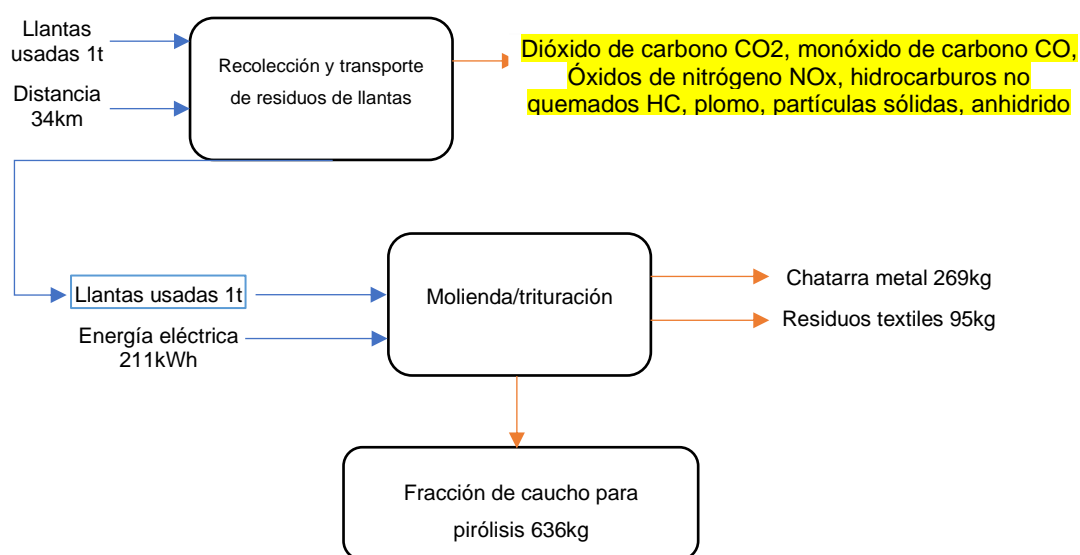
Flujo o proceso	Cantidad	Unidad	Fuente de datos	Conjunto de datos LCI
ENTRADA				
Cantidad de llantas tratadas	1000	kg	Asumido	
Distancia recolección a planta	34	km	Asumido	GLO: camión-remolque euro 2.7-6t peso bruto/3t carga útil
Demanda de Diesel	3.73	kg	Cantidad de combustible calculada en función del consumo anual	DE: Mezcla de diésel en la estación de servicio Sphera, emisiones basadas en (Fuc et al., 2016)
Demanda de electricidad	211	kWh	Medido	DE: mix de red eléctrica sphera (2020)

SALIDA			
Fracción de caucho para pirólisis	636 kg	Medido	
Chatarra metal	269 kg	Medido	DE: Perfil de acero con potencial de reciclaje (D) Sphera
Residuos textiles	95 kg	Medido	Modelo de ACV para combustión en planta de cemento y sustitución de la mezcla de combustible

Nota. Balance de masa y energía del proceso de trituración mecánica de llantas. (Malijonyte et al., 2016)

Figura 19.

Diagrama de proceso trituración



Nota. Diagrama de proceso y balance de masa de la trituración mecánica de llantas, en donde se tiene en cuenta el proceso de recolección y transporte de los residuos para posteriormente realizar la trituración de llantas, las flechas azules representan las entradas al proceso y las flechas naranja representan las salidas después de terminar la trituración.

3.3.2.b. Pirólisis de llantas. Este proceso es el principal estudio de nuestro análisis, como bien se ha mencionado anteriormente, se desarrolla a temperatura y presión elevadas en ausencia de oxígeno, se presentan las entradas teniendo en cuenta los materiales y fuentes de energía para su funcionamiento, adicional a esto uno de los materiales de

entrada es material de salida del proceso de trituración el cual es la llanta lista para poder ser procesada.

Con respecto a las salidas del sistema se tienen en cuenta los productos que pueden ser reutilizados que presentan un alto valor agregado a cualquier proceso que se incluyan, en la tabla 11 se presenta balance de masa y diagrama de proceso.

Tabla 11.

Balance de masa proceso de pirólisis

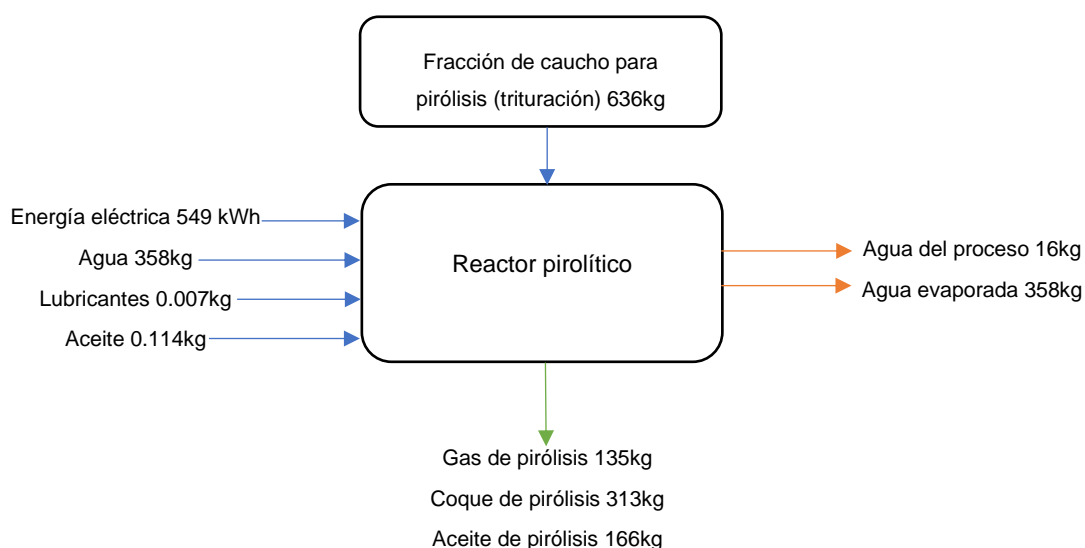
Flujo o proceso	Cantida d	Unida d	Fuente de datos	Conjunto de datos LCI
ENTRADA				
Cantidad de caucho	636	kg		
Consumo de electricidad para pirolisis, así como demanda de refrigeración y consumo propio de la unidad de cogeneración	549	kWh	Medido	Conjunto de datos propio para la generación de electricidad
Demanda de agua	358	kg	Medido	DE: Agua de grifo procedente de aguas superficiales Sphera
Consumo de aceite del compresor	0,114	kg	Medido	DE: Fuelóleo pesado en refinería (1,0% en peso S) Sphera
SALIDA				
Gas de pirólisis	135	kg	Medido	
Coque de pirólisis	313	kg	Medido	
Aceite de pirólisis	166	kg	Medido	
Agua de proceso	16	kg	Medido	

Agua evaporada	358 kg	Medido
-----------------------	---------------	---------------

Nota. Balance de masa de las entradas y salidas del proceso de pirólisis, incluyendo el producto resultante de la trituración mecánica (Malijonyte et al., 2016)

Figura 20.

Diagrama de proceso pirólisis



Nota. Diagrama de proceso y balance de masa de pirólisis de llantas, en donde se representan las entradas al sistema teniendo en cuenta la fracción de caucho anteriormente obtenida en la trituración representado con flechas azules, con respecto a las salidas del sistema se representan con flechas naranjas y una verde el cual son los tres residuos más importantes del proceso de pirólisis.

3.3.3. Evaluación de impactos

En esta etapa de análisis se determina que tan significativamente serán los impactos ambientales que pueda causar el proceso de valorización mediante el ACV, por eso es importante asociar los indicadores para tener en cuenta con el fin de obtener los resultados finales.

Actualmente se presentan diferentes bases de datos para realizar este análisis como lo son Institute of environmental sciences (CML), Ecoindicador 99, Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI), entre otras (Hu et al., 2024), donde su función es integrar diferentes categorías de impacto teniendo en cuenta el enfoque que se quiera dar a la investigación, en este caso de estudio se hará

uso de la base de datos CML-IA (baseline) desarrollada por el centro de ciencias ambientales de la Universidad de Leiden, la cual se enfoca en la evaluación de cinco principales categorías de impacto, como lo son eutrofización del agua, creación de oxidantes fotoquímicos, calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono y acidificación del agua, en la tabla 12 se detallan dichos impactos.

Tabla 12.

Impactos ambientales del ACV

Categoría de impacto	Unidades	Referencia
Calentamiento global	Kg CO2 eq	(Forster et al., 2010)
Agotamiento del ozono estratosférico	Kg CFC-11 eq	(Scientific Assessment of Ozone Depletion, 1998)
Impactos toxicológicos en humanos	Kg 1,4-DB eq	(Fantke et al., n.d.)
Impactos ecotoxicológicos	Kg 1,4-DB eq	(Fantke et al., n.d.)
Acidificación	Kg SO2 eq	(Seppälä et al., 2006)
Eutrofización Terrestre	Kg PO4 eq	(Seppälä et al., 2006)

Nota. Impactos ambientales que se van a tener en cuenta para el ACV del presente estudio.

Se da una breve descripción de lo que representa cada uno de los impactos anteriormente mencionados.

- **Calentamiento global:** Es el efecto que genera el incremento de temperatura de la atmosfera, debido al alto grado de concentración de dióxido de carbono y otro tipo de gases de efecto invernadero.
- **Agotamiento del ozono estratosférico:** Degradación de compuestos clorofluorocarbonados, hidroclofluorocarbonados, entre otras, lo cual genera un aumento en la incidencia de la radiación ultravioleta impactando en los seres humanos.

- Impactos ecotoxicológicos y toxicológicos: Efectos sobre la salud humana debido a la emisión de metales pesados, donde se evalúa la concentración tolerable del agua y aire Acidificación: Se genera principalmente por la liberación de protones (H+) en ecosistemas acuáticos o terrestres, generando muerte de los bosques y acidificación del agua.
- Eutrofización terrestre: Su principal causa es el exceso de nitrógeno, fosforo, entre otras sustancias orgánicas, como consecuencia fomenta la diversidad de especies terrestres.

Para mayor entendimiento, en la figura 21 se presenta las entradas y salidas del proceso de trituración mecánica y en la figura 22 se presenta entradas y salidas del proceso de pirólisis.

Figura 21.

Entradas y salidas de trituración mecánica

Entradas/Salidas - Llanta a tritura

Entradas										
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Costes/Ingre...	Incertidumbre	Avoided wa...	Proveedor p...	Entrada de c...	Ubicación	Descripción
electricity from hydroelec...	Energy carriers and technol...	211.00000	kWh		none		Electricity...			
transport in t*km	Transport services/Other tr...	1*34	t*km		none		Small lorr...			
Coal, feedstock, 26.4 MJ/Resource/unspecified	1000.00000	kg		none					

Salidas										
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Costes/Ingre...	Incertidumbre	Producto evi...	Proveedor p...	Entrada de c...	Ubicación	Descripción
Tritura		1000.00000	kg		none					
landfill of textiles	End-of-life treatment/Land...	95.00000	kg		none	<input type="checkbox"/>				
Coal, feedstock, 26.4 MJ/Resource/in ground	636.00000	kg		none					
Steel waste	./Waste/ecopoints 97, CH	269.00000	kg		none					

Nota. Representación del balance de masa anteriormente presentado, plasmado en el software OpenLCA

Figura 22.

Entradas y salidas de pirólisis

Entradas/Salidas - Tritura a Pirólisis - CO

Entradas										
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Costes/Ingre...	Incertidumbre	Avoided wa...	Proveedor p...	Entrada de c...	Ubicación	Descripción
electricity from hydroelec...	Energy carriers and technol...	549.00000	kWh		none		Electricity...			
tall oil	Materials production/Orga...	0.11400	kg		none		Graphic P...			
Tritura		636.00000	kg		none		Lianta a t...			
Water for industrial use	Materials production/Water	358.00000	kg		none		Steel sect...			

Salidas										
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Costes/Ingre...	Incertidumbre	Producto evi...	Proveedor p...	Entrada de c...	Ubicación	Descripción
Pirólisis		636.00000	kg		none					
waste water - treated	End-of-life treatment/Wast...	16.00000	kg		none					
Coke oven emissions, uns...	./Emission to air/unspecifi...	313.00000	kg		none					
Gas pipe waste	./Waste/ecopoints 97, CH	135.00000	kg		none					
Oils, biogenic	./Emission to soil/industrial	166.00000	kg		none					
Water vapour	./Emission to air/high pop...	358.00000	kg		none					

Nota. Representación del balance de masa del proceso de pirólisis, en donde se evidencia la inclusión del proceso de trituración previamente representado.

En base a los parámetros de evaluación anteriormente mencionados, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para el ciclo de vida de pirólisis, a través de las siguientes figuras.

Figura 23.

Resultado de acidificación

Categoría de impacto



Nota. Resultados de acidificación en el proceso de pirólisis, evidenciando que la generación de energía por medio de hidroeléctrica aporta mayor proporción.

La acidificación en el proceso de pirólisis de llantas se presenta principalmente por la descomposición térmica de los componentes químicos en la llanta, donde son primordiales el azufre y el cloro, ya que a elevadas temperaturas forman compuestos ácidos como el sulfuro de hidrogeno y el cloruro de hidrogeno, donde la formación de estos ácidos también es causada por la temperatura, la presión de funcionamiento y la velocidad en que se calienta la llanta.

Como se puede observar en la figura anterior, el proceso de reciclaje de acero tiene un mayor aporte a la reducción de la acidificación, ya que este es un material altamente reciclable y depende de la preparación de la llanta al ingresar al reactor pirolítico, adicional a esto el uso de diferentes métodos de valorización aporta mayor confiabilidad para que el caucho esté listo para ser valorizado.

Con el fin de mitigar este tipo de contaminación en el proceso, es recomendable mantener control de la temperatura, implementar sistemas de tratamiento de gases como filtros para evitar que los compuestos ácidos sean liberados al ambiente y por último aplicar catalizadores que ayuden a minimizar la producción de estos compuestos ácidos.

Figura 24.

Resultados de cambio climático



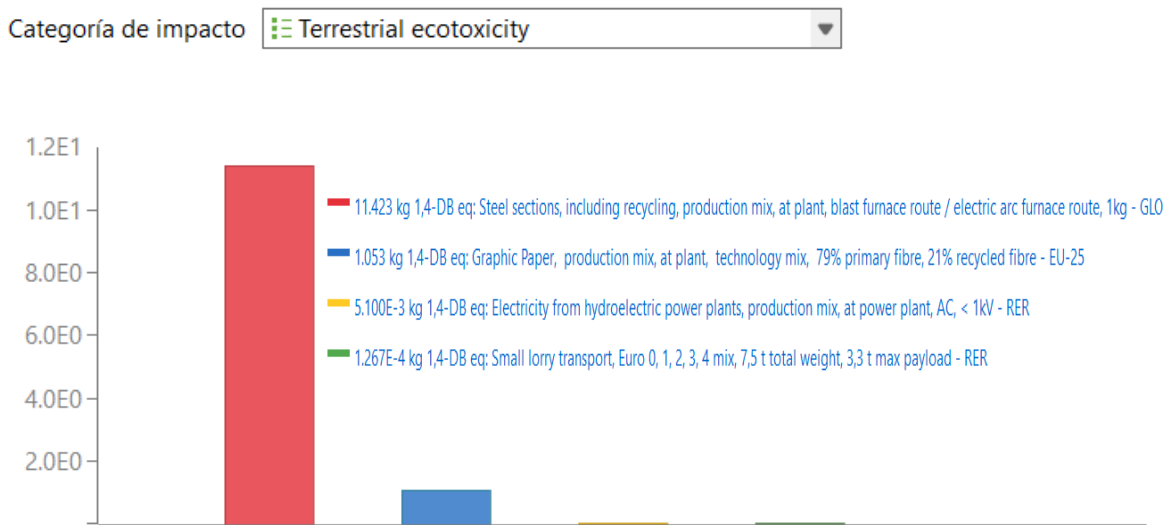
Nota. Resultados de cambio climático en el proceso de pirólisis, evidenciando que la generación de energía por medio de hidroeléctrica aporta mayor proporción.

El impacto que tiene el cambio climático sobre el proceso de pirólisis de llantas afecta diferentes parámetros que se deben tener en cuenta para el correcto funcionamiento de la planta, uno de ellos son las condiciones ambientales las cuales se ha presentado cambios meteorológicos extremos afectando así la operación de la planta viéndose afectado el espacio de instalación o la estabilidad del suministro de energía eléctrica, por otro lado se ve afectada la calidad de las sustancias generadas, ya que para ser usadas deben pasar por otro proceso como el refinamiento el cual hace uso de recursos naturales (Miranda et al., 2006).

Se evidencia que el cambio climático no afecta directamente el proceso de pirólisis, pero si los efectos indirectos que pueden influir en la ejecución del proceso, como se puede observar en la figura anterior el proceso de reciclaje de acero es el que más aporta positivamente a este impacto, haciendo que se reduzca el uso de los recursos naturales, por otro lado, la generación de electricidad en Colombia es por medio de hidroeléctricas la cual es una fuente de energía renovable que se genera por la fuerza del movimiento del agua, por ende su aporte a la mejora del cambio climático es mayor.

Figura 25.

Resultados de ecotoxicidad



Nota. Resultados de ecotoxicidad en el proceso de pirólisis, evidenciando que la generación de caucho natural aporta mayor proporción.

En el proceso de pirólisis de llantas la ecotoxicidad se deriva principalmente de la generación de metales pesados que al ser liberados pueden acumularse en los suelos y los organismos vivos, compuestos orgánicos volátiles los cuales son altamente tóxicos para la flora y la fauna además de aportar a la formación de ozono troposférico, entre otras sustancias peligrosas, las cuales pueden llegar a contaminar el suelo, agua y aire (Peña et al., 2019).

Como se puede evidenciar en la figura anterior el reciclaje de acero presenta un mayor aporte positivo a este impacto, ya que el pretratamiento que se le hace a la llanta es fundamental para evitar este tipo de contaminación, por otro lado, el uso de materias primas reciclables aporta un mayor beneficio al proceso.

Es fundamental tener una adecuada gestión del residuo, optimizar el proceso y mantener el sistema de gases controlado, con el fin de minimizar los impactos ambientales negativos que se puede presentar al finalizar el proceso de pirólisis de llantas.

Figura 26.

Resultados de eutrofización



Nota. Resultados de eutrofización en el proceso de pirólisis, evidenciando que la generación de electricidad para la fabricación del caucho aporta mayor proporción.

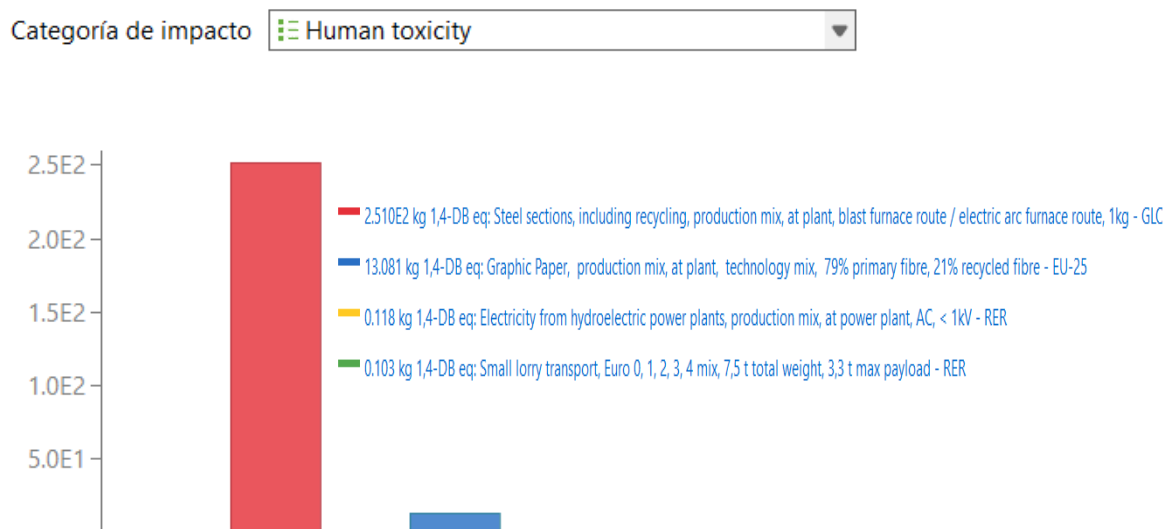
La eutrofización no está directamente relacionada con la pirólisis de llantas, sin embargo, se debe tener en cuenta que las sustancias obtenidas durante el proceso si no son

procesadas para su uso, pueden llegar a contaminar cuerpos de agua por el mal manejo de este tipo de sustancias, adicional a esto los compuestos generados en el proceso no son nutrientes que aporten a la eutrofización.

Aunque este contaminante no este directamente relacionado con la pirólisis de llantas, se debe monitorear cada uno de los pasos del proceso con el fin de evitar la contaminación de los recursos, por eso como se puede observar en la figura anterior el proceso de reciclaje de acero lidera el aporte positivo para este impacto en mención, lo que quiere decir que se debe seguir con el programa de monitoreo de los residuos sólidos antes de ingresar a la planta y al finalizar el proceso.

Figura 27.

Resultados de toxicidad humana



Nota. Resultados de toxicidad humana en el proceso de pirólisis, evidenciando que la producción de caucho aporta mayor proporción.

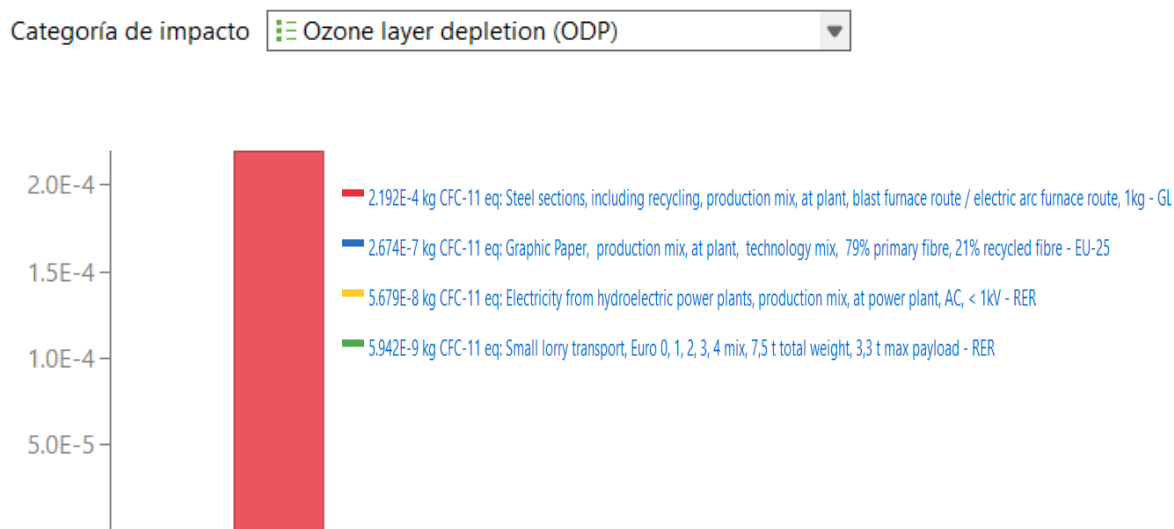
Como bien ya se ha mencionado que durante el proceso de pirólisis se liberan contaminantes que son altamente tóxicos, la ecotoxicidad humana es uno de los factores más importantes a tratar ya que la exposición humana a este tipo de contaminantes puede generar diferentes consecuencias en los humanos, por ejemplo al inhalar el aire contaminado se puede producir daños en el sistema respiratorio, asma, enfermedades pulmonares, entre otras asociadas al sistema respiratorio, por otro lado la ingestión de

estos contaminantes puede generar problemas gastrointestinales y enfermedades crónicas (Ardila et al., 2017).

Se debe hacer énfasis en las medidas de control adecuadas para mitigar la generación y exposición de estos contaminantes ya que se despliega una amplia variedad de afectaciones a la salud altamente dañinos.

Figura 28.

Resultados de agotamiento de ozono



Nota. Resultados de agotamiento de ozono en el proceso de pirólisis, evidenciando que la distribución y fin de su vida útil aporta mayor proporción.

El agotamiento de ozono es un impacto indirecto en el proceso de pirólisis de llantas, ya que los compuestos que afectan este impacto son los clorofluorocarbonos (CFCs) y las llantas no cuentan con este tipo de compuestos, sin embargo, durante el proceso se puede liberar benceno, tolueno y xileno que, aunque no hacen parte de los CFCs su liberación puede provocar reacciones químicas en la atmósfera que afecten la capa de ozono.

Como se puede observar en la figura anterior el reciclaje de acero es un aporte positivo al proceso de pirólisis ya que reduce esa exposición a las altas condiciones del proceso y la liberación de contaminantes a su vez.

Luego de observar los impactos ambientales potenciales obtenidos en el software OpenLCA 2.0 asociados al proceso de pirólisis, se llega a la conclusión que el resultado donde más se presenta una atribución a los bajos impactos ambientales, es el proceso de reciclaje de acero, ya que este es un material que se considera 100% reciclable, obteniendo una misma calidad del producto donde se puede incluir en cualquier proceso productivo bien sea fabricación de automóviles, maquinarias, construcción, entre otros.

Adicional a esto en la categoría de calentamiento global teniendo como base a 100 años, la generación de electricidad por hidroeléctrica es el segundo proceso que aporta positivamente a este impacto, ya que se presenta un alto rendimiento del proceso en donde se obtiene más o menos el 90 al 95% de aprovechamiento de la energía potencial del agua (Iberdrola, n.d.), este ayuda a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo cual es muy beneficioso para el proceso de pirólisis ya que puede requerir el alto uso de energía eléctrica.

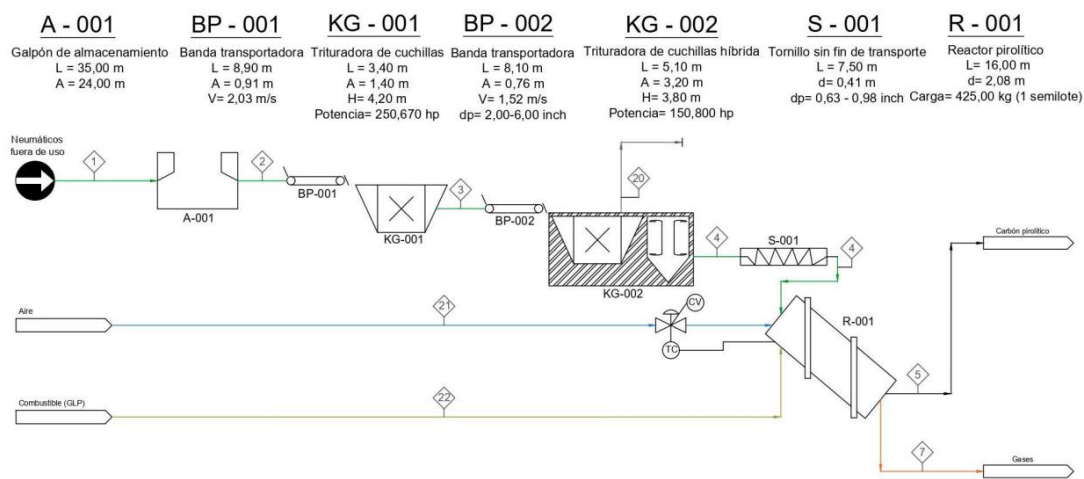
Con respecto al resultado mencionado en el software “Graphic Paper, Production Mix, At Plant, Technology Mix, 79% Primary Fibre, 21% Recycled Fibre – EU-25”, se refiere a la mezcla de tecnologías usadas para el proceso, en donde anteriormente se menciona en las entradas de pirólisis el caucho triturado y listo para ser valorizado, adicional a esto mientras se realiza el proceso de pirólisis se van reutilizando residuos que cuentan con un considerable porcentaje de aporte de energía, el cual es usado para mantener la incineración de la llanta en el reactor pirolítico, en la mayoría de las categorías a evaluar este proceso es el segundo aportante a la reducción de los impactos generados, se deja la observación que este resultado se tiene en cuenta en el software debido a la falta de disponibilidad de datos representativos al uso de biorresiduos como los que se obtienen en la pirólisis. Este mismo proceso es el que más impacta positivamente a las emisiones con respecto a la toxicidad humana, ya que se generan residuos que se pueden reusar y su composición es un poco más limpia.

Con respecto a la óptima ejecución del proceso se recomienda tener un diseño adecuado de la planta, como paso principal se debe contar con un destalonado el cual consiste en retirar el acero de la llanta para posteriormente ser cortada y triturada con las maquinas trituradoras correspondientes, para luego ser ingresado al reactor pirolítico donde las

sustancias obtenidas son llevadas a un ciclón en donde se separa la fracción sólida, líquida y gaseosa o vapores teniendo en cuenta los sistemas de control de fugas, con respecto a los sólidos se pulverizan para su respectivo tratamiento y los gases pasan por una columna de enfriamiento, a continuación, en la figura 29 se presenta el diagrama de flujo de una planta de pirólisis de llantas que puede ser tenida en cuenta para su fabricación.

Figura 29.

Diagrama de flujo planta de pirólisis de llantas



Nota. se presenta diagrama de flujo y maquinaria a usar para un adecuado proceso de pirólisis de llantas. Tomado de: Yáñez Tapia, M. M. (2021). Diseño de una planta para la obtención de combustible líquido por medio de pirólisis de neumáticos fuera de uso (NFU). 235 hojas. Quito: EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21984>

Con respecto a los retornos que puede presentar la implementación de este proceso se estima que los productos líquidos pueden ser vendidos más o menos en 2.20USD/gal y los productos sólidos en 3.50USD/kg, lo que quiere decir que se estima una TIR de 30.49%, el cual presenta una alta rentabilidad del proceso a pesar de que su inversión inicial es elevada (Yáñez Tapia, 2021).

Teniendo en cuenta el artículo en que se basaron los balances de masa y energía en este estudio, se llega a la conclusión que el gas pirolítico en conjunto con el gas natural usado para la incineración es uno de los mayores aportantes a la reducción de emisiones, así mismo, el residuo de coque o negro carbón resultante de la pirólisis aporta mayor

volumen por ende también aporta beneficios con respecto a las emisiones y puede ser usado en diferentes procesos productivos dependiendo del enfoque que se le quiera dar.

Como se puede reflejar en los resultados obtenidos la pirólisis de llantas usadas es un proceso altamente beneficioso en el ámbito de sostenibilidad ambiental, ya que aporta a cada una de las categorías que lo comprenden, a pesar de que aún se están estudiando más alternativas de pirólisis y mejoras para el aporte de beneficios medio ambientales, la aplicación de este proceso sigue siendo muy visto y beneficioso para cualquier industria.

4. CONCLUSIONES

Se identificaron las características de las llantas usadas en Bogotá para su aprovechamiento en donde se evidencia que las llantas a medida que van siendo desgastadas su elasticidad y flexibilidad pueden disminuir causando que se vuelvan más rígidas, su densidad y peso también pueden ser afectados debido a la combinación de acero, tela y caucho, el tamaño de las llantas también puede llegar a afectar el proceso de valorización que se vaya a tener en cuenta. Para determinar una adecuada gestión de estos residuos se debe tener en cuenta el nivel de desgaste, las propiedades de los materiales y estado de las llantas para determinar su capacidad de reciclabilidad.

Por medio de la metodología basada en el modelo AHP y el uso del software SuperDesicions, se hizo el comparativo de los procesos de valoración más vistos en la ciudad de Bogotá siendo la pirólisis el proceso el más viable debido a que presenta mayor beneficio ambiental generando subproductos que son de un alto valor agregado, por otro lado en el ámbito social se desempeña muy bien ya que al ser un proceso controlado disminuye la contaminación y por ende las enfermedades que se puedan presentar por consecuencia de este y por último en el ámbito económico aunque su instalación y manejo de planta puede tener un alto costo, este puede ser recuperado mediante la implementación de economía circular y reducir costos de operación.

Se determinó la sostenibilidad del proceso de valoración mediante la herramienta de análisis de ciclo de vida usando el software OpenLCA, y se obtuvieron como resultados más significativos la reducción de la huella de carbono en comparación con otros métodos de valoración, siendo su mayor ventaja la obtención de productos útiles como lo es el aceite, el gas y el carbón vegetal haciendo que se reduzca el uso de materias primas, este proceso debe ser equipado con tecnologías que controlen las emisiones generadas, frente a los aspectos económicos se da un valor agregado a la comercialización de los productos obtenidos, sin embargo su instalación y operación pueden ser un poco elevados y por último, en el ámbito social se pueden evidenciar beneficios como la generación de empleo en el sector, la mejora de la calidad ambiental y la mejora en conciencia ambiental dando cumplimiento a los objetivos de desarrollo sostenible.

REFERENCIAS

- Abbas-Abadi, M. S., Kusenbergh, M., Shirazi, H. M., Goshayeshi, B., & van Geem, K. M. (2022). Towards full recyclability of end-of-life tires: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 374. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134036>
- Abdullah, Z. T. (2024). Remanufactured waste tire by-product valorization: Quantitative–qualitative sustainability-based assessment. *Results in Engineering*, 22, 102229. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102229>
- Acosta Rendon Melissa, Bernstein Nora, Dienot Pierre, Hurtado Franco María, & Peña Villa Juan Jose. (2019). Análisis de ciclo de vida comparativo de llantas usadas en trituración mecánica en condiciones ambientales y criogénicas.
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2001), Observatorio de dinámica urbana (volúmenes 1 y 2). Colección Dinámica Urbana, Departamento Administrativo de Planificación, Bogotá. ISBN 978-958-96917-7-9
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (n.d.-a). Control a la disposición de llantas usadas en Bogotá. <https://Bogota.Gov.Co/Mi-Ciudad/Ambiente/Control-La-Disposicion-de-Llantas-Usadas-En-Bogota>.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (n.d.-b). Nuevo parque automotor y policías para Bogotá. <https://Bogota.Gov.Co/Mi-Ciudad/Nuevo-Parque-Automotor-y-Policias-Para-Bogota>.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (n.d.-c). Páramo de Sumapaz. <https://Www.Bogota.Gov.Co/Localidades/Sumapaz/Paramo-de-Localidad>.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (n.d.-d). Recolección de llantas en Bogotá. <https://Bogota.Gov.Co/Asi-Vamos/Recoleccion-de-Llantas-En-Bogota>.

- Al-Qadri, A. A., Ahmed, U., Ahmad, N., Abdul Jameel, A. G., Zahid, U., & Naqvi, S. R. (2024). A review of hydrogen generation through gasification and pyrolysis of waste plastic and tires: Opportunities and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 77, 1185–1204. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.06.207>
- Alsaleh, A., & Sattler, M. L. (2014). Waste Tire Pyrolysis: Influential Parameters and Product Properties. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 1(4), 129–135. <https://doi.org/10.1007/S40518-014-0019-0>
- Al-Salem, S. M. (2020). Valorisation of End of Life Tyres (ELTs) in a Newly Developed Pyrolysis Fixed-Bed Batch Process. *Process Safety and Environmental Protection*, 138, 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.020>
- Antecedentes de la implantación de los planes de manejo de productos posconsumo y residuos Dra. Cristina Cortinas de Nava - ppt descargar. (n.d.). Retrieved August 17, 2024, from <https://slideplayer.es/slide/3906430/>
- Appleton, T. J., Colder, R. I., Kingman, S. W., Lowndes, I. S., & Read, A. G. (2005). Microwave technology for energy-efficient processing of waste. *Applied Energy*, 81(1), 85–113. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2004.07.002>
- Ardila, A. N., & Arriola, E. (2021). Efecto de la quema de llantas en la calidad del agua de un tramo de la quebrada Piedras Blancas. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222017000500039#:~:Text=Las%20llantas%20usadas%20se%20convierten, Renovables%2C%20y%20afectan%20el%20paisaje.

Azunna, S. U., Aziz, F. N. A. A., Rashid, R. S. M., & Bakar, N. B. A. (2024). Review on the characteristic properties of crumb rubber concrete. *Cleaner Materials*, 12, 100237. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2024.100237>

Base de datos -ecoinvent. (n.d.). Retrieved August 24, 2024, from <https://ecoinvent.org/database/>

Bi, R., Zhang, Y., Jiang, X., Yang, H., Yan, K., Han, M., Li, W., Zhong, H., Tan, X., Xia, L., Sun, X., & Xiang, S. (2022). Simulation and techno-economical analysis on the pyrolysis process of waste tire. *Energy*, 260, 125039. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.125039>

Bianco, I., Panepinto, D., & Zanetti, M. (2021). End-of-life tyres: Comparative life cycle assessment of treatment scenarios. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/APP11083599>

Bogotá - Google Maps. (n.d.). Retrieved January 26, 2024, from <https://www.google.com/maps/place/Bogot%C3%A1/@4.6482975,-74.107807,11z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x8e3f9bfd2da6cb29:0x239d635520a33914!8m2!3d4.7109886!4d-74.072092!16zL20vMDFkenlj?entry=ttu>

Bogotá. (2022, February 28). Así se libra Bogotá de la pesadilla de las llantas. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/bogota/bogota-que-hacen-con-las-llantas-que-se-botan-a-la-basura-654741>

Cámara de comercio de Bogotá. (2006). Guía para el manejo de llantas usadas. Extraído de: <https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/506375/Gu%C3%ADa+para+el+manejo+de+llantas+usadas.pdf/f875a669-7451-47b1-892d-caf6f8294eb4>

- Camelo, M. D. F. (2022, December 2). Gestión integral de residuos en Bogotá. Observatorio Ambiental De Bogotá. <https://oab.ambientebogota.gov.co/gestion-integral-de-residuos-en-bogota/>
- Carmona, E. G. (2020). XVIII CONGRESO INTERNACIONAL y XXIV CONGRESO NACIONAL DE CIENCIAS AMBIENTALES. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 36, 1-845. <https://doi.org/10.20937/rica.2020.36.mciycnca>
- Chen, B., Zheng, D., Xu, R., Leng, S., Han, L., Zhang, Q., Liu, N., Dai, C., Wu, B., Yu, G., & Cheng, J. (2022). Disposal methods for used passenger car tires: One of the fastest growing solid wastes in China. Green Energy and Environment, 7(6), 1298–1309. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2021.02.003>
- Control a la disposición de llantas usadas en Bogotá | Bogota.gov.co. (n.d.). Retrieved February 12, 2024, from <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/control-la-disposicion-de-llantas-usadas-en-bogota>
- COPROCESAMIENTO - Recycomb - Transformamos desechos en energía. (n.d.). Retrieved August 17, 2024, from <http://www.recycomb.com.ar/coprocesamiento/>
- Coprocesamiento. (n.d.). Manejo responsable de llantas usadas. <https://Coprocesamiento.Org/Manejo-Responsable-de-Llantas-Usadas/>.
- Corporate Sustainability Software | Sphera. (n.d.). Retrieved August 24, 2024, from <https://sphera.com/solutions/environment-health-safety-sustainability/corporate-sustainability-software/>

- Corresponsables. (2023). Llantatón Bridgestone 2023: Se logró recolectar 220 toneladas de llantas usadas. <https://Colombia.Corresponsables.Com/Actualidad/Llantaton-Bridgestone-2023-Se-Logro-Recolectar-220-Toneladas-de-Llantas-Usadas>.
- Corti, A., & Lombardi, L. (2004). End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA. *Energy*, 29(12-15 SPEC. ISS.), 2089–2108. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.014>
- Cruz Sosa, J. D. (2018). Influencia de los desechos de llantas del parque automotor en el medio ambiente y en la sociedad de la ciudad de Bogotá en la localidad de Puente Aranda. In *Influencia de los desechos de llantas del parque automotor en el medio ambiente y en la sociedad de la ciudad de Bogotá en la localidad de Puente Aranda*. <https://doi.org/10.15332/tg.pre.2020.00085>
- Czajczyńska, D., Czajka, K., Krzyżyńska, R., & Jouhara, H. (2020). Waste tyre pyrolysis – Impact of the process and its products on the environment. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100690>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2023). Boletín de resultados: Encuesta de transporte urbano de pasajeros (ETUP), tercer trimestre de 2023.
- Dobrotă, D., Dobrotă, G., & Dobrescu, T. (2020). Improvement of waste tyre recycling technology based on a new tyre markings. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121141. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121141>
- Dong, Y., Zhao, Y., Hossain, M. U., He, Y., & Liu, P. (2021). Life cycle assessment of vehicle tires: A systematic review. *Cleaner Environmental Systems*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100033>

Downard, J., Singh, A., Bullard, R., Jayarathne, T., Rathnayake, C. M., Simmons, D. L., Wels, B. R., Spak, S. N., Peters, T., Beardsley, D., Stanier, C. O., & Stone, E. A. (2015). Uncontrolled combustion of shredded tires in a landfill - Part 1: Characterization of gaseous and particulate emissions. *Atmospheric Environment*, 104, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.059>

Eco Green Equipment. (n.d.). A beginner's guide to tire shredding and recycling. Retrieved September 8, 2024, from <https://ecogreenequipment.com/es/a-beginners-guide-to-tire-shredding-and-recycling/>

Eco Green Equipment. (n.d.). Ambient vs. cryogenic rubber grinding. Retrieved September 8, 2024, from <https://ecogreenequipment.com/es/ambient-vs-cryogenic-rubber-grinding/#:~:text=Cuando%20se%20utiliza%20el%20proceso,de%20I%C3%ADneas%20rectas%20y%20suaves>

Ecogreen Equipment. (n.d.). Environmental impacts of wastetire disposal. <https://ecogreenequipment.com/es/Environmental-Impacts-of-Waste-Tire-Disposal/#:~:Text=Simplemente%20sentado%20al%20sol%2C%20una,Negro%20t%C3%B3xico%20en%20el%20aire.>

el Tiempo. (2022). ¿Qué hacen con las llantas que se botan a la basura? <https://www.eltiempo.com/Bogota/Bogota-Que-Hacen-Con-Las-Llantas-Que-Se-Botan-a-La-Basura-654741#:~:Text=Con%20el%20primer%20convenio%2C%20en,Y%201.721%20en%20el%202022.>

- Enengel, M. J., Viczek, S. A., & Sarc, R. (2023). Determining the recycled content in cement: A study of Austrian cement plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107276>
- Esperanza Haya Leiva. (2016). Escuela de Organización Industrial- Máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental- "Análisis de Ciclo de Vida". Obtenido de Escuela de Organización Industrial- Máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental- "Análisis de Ciclo de Vida": file:///D:/David/Descargas/teoria_acv_migma1.pdf
- Fantke, E. P., Bijster, M., Guignard, C., Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., Kounina, A., Magaud, V., Margni, M., Mckone, T., Posthuma, L., Rosenbaum, R. K., van de Meent, D., & van Zelm, R. (n.d.). UNEP/SETAC scientific consensus model for characterizing human toxicological and ecotoxicological impacts of chemical emissions in life cycle assessment. <https://doi.org/10.11581/DTU:00000011>
- Fattuhi, N. I., & Clark, L. A. (1996). Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Construction and Building Materials*, 10(4), 229–236. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(96\)00004-9](https://doi.org/10.1016/0950-0618(96)00004-9)
- Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020). Recycling waste tires into ground tire rubber (Gtr)/rubber compounds: A review. *Journal of Composites Science*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/JCS4030103>
- Fernández, J. A. (2018). Análisis multicriterio y la aplicación del método AHP en la evaluación de proyectos. [https://Revistas.Javeriana.Edu.Co/Files-Articulos/CC/19-47%20\(2018\)/151556994010/](https://Revistas.Javeriana.Edu.Co/Files-Articulos/CC/19-47%20(2018)/151556994010/).
- Fiksel, J., Bakshi, B. R., Baral, A., Guerra, E., & Dequervain, B. (2011). Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. *Clean Technologies*

- and Environmental Policy, 13(1), 19–35. <https://doi.org/10.1007/S10098-010-0289-1>
- Firestone. (n.d.). ¿Cómo es el proceso de fabricación de las llantas?
<https://www.firestone.com.mx/tips-firestone/tecnologia-de-llantas/como-es-el-proceso-de-fabricacion-de-llantas/>.
- Forster, P., Ramaswamy, P., Artaxo, T., Berntsen, R., Betts, D., Fahey, J., Haywood, J., Lean, D. C., Lowe, G., Myhre, J., Nganga, R., Prinn, G., Raga, M., & Schulz and R. Van Dorland. (2010). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.
- Fuc, P., Kurczewski, P., Lewandowska, A., Nowak, E., Selech, J., & Ziolkowski, A. (2016). An environmental life cycle assessment of forklift operation: a well-to-wheel analysis. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(10), 1438–1451. <https://doi.org/10.1007/S11367-016-1104-Y>
- Godas, L. (09 de 2006). Ambito farmacéutico- Gestión farmacéutica- "El ciclo de vida del producto". Obtenido de Ambito farmacéutico- Gestión farmacéutica- "El ciclo de vida del producto": <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-pdf-13094134>
- Grammelis, P., Margaritis, N., Dallas, P., Rakopoulos, D., & Mavrias, G. (2021). A review on management of end of life tires (Elts) and alternative uses of textile fibers. *Energies*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/EN14030571>
- Guateambiente. (n.d.). ¿Qué es un análisis de ciclo de vida?
<https://www.guateambiente.org/que-es-un-analisis-de-ciclo-de-vida/>.

- Heijungs, R., & Guinée, J. B. (2007). Allocation and “what-if” scenarios in life cycle assessment of waste management systems. *Waste Management*, 27(8), 997–1005. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.013>
- Hersh, B., & Mirkouei, A. (2019). Life cycle assessment of pyrolysis-derived biochar from organic wastes and advanced feedstocks. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 4. <https://doi.org/10.1115/DETC2019-97896>
- Hildenbrand, J., Srocka, M., & Ciroth, A. (2006). *OpenLCA (2.0)*.
- Hischier, R. (2010). Documentation of changes implemented in ecoinvent Data v2.2.
- Hu, Y., Yu, X., Ren, J., Zeng, Z., & Qian, Q. (2024). Waste tire valorization: Advanced technologies, process simulation, system optimization, and sustainability. *Science of the Total Environment*, 942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173561>
- Iberdrola. (n.d.). Que es la energía hidroeléctrica, ¿Sabes cómo funcionan las centrales hidroeléctricas? <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-hidroelectrica#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20hidroel%C3%A9ctrica%20es%20aquella,libre%20de%20emisiones%20y%20aut%C3%B3ctono>.
- Informe del sector automotor marzo de 2023.pdf - Google Drive. (n.d.). Retrieved January 24, 2024, from <https://drive.google.com/file/d/1fC2TRzAWKr7bQdvZ-5ViGGuyJeth210/view?pli=1>
- Ingemarsdotter, E., Diener, D., Andersson, S., Jonasson, C., Mellquist, A. C., Nyström, T., Jamsin, E., & Balkenende, R. (2021). Quantifying the Net Environmental Impact of Using IoT to Support Circular Strategies—The Case of Heavy-Duty Truck Tires in Sweden. *Circular Economy and Sustainability*, 1(2), 613–650. <https://doi.org/10.1007/S43615-021-00009-0>

- Instituto de Estudios Urbanos. (n.d.). Hidrología urbana. [Http://Institutodeestudiosurbanos.Info/Endatos/0100/0110/0112-Hidro/011212.Htm](http://Institutodeestudiosurbanos.Info/Endatos/0100/0110/0112-Hidro/011212.Htm).
- ISO 14040:2006 - Gestión medioambiental — Evaluación del ciclo de vida — Principios y marco de referencia. (n.d.). Retrieved August 24, 2024, from <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. (n.d.). Retrieved August 24, 2024, from <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- Karthikeyan, N. K., & Elavenil, S. (2024). Dispersion effect of nano-structure pyrolytic carbon on mechanical, electrical, and microstructural characteristics of cement mortar composite. *International Journal of Smart and Nano Materials*. <https://doi.org/10.1080/19475411.2024.2386667>
- Landi, D., Gigli, S., Germani, M., & Marconi, M. (2018). Investigating the feasibility of a reuse scenario for textile fibres recovered from end-of-life tyres. *Waste Management*, 75, 187–204. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.02.018>
- Las ventajas del reciclaje de llantas» Proyectos llave en mano para el tratamiento y reciclado de residuos. - GTA Ambiental. (n.d.). Retrieved August 17, 2024, from <https://gtaambiental.com/ventajas-reciclaje-llantas/>
- Lee, H., Im, J., Cho, H., Jung, S., Choi, H., Choi, D., Kim, J., Lee, J., & Kwon, E. E. (2024). Hydrogen production from fishing net waste for sustainable clean fuel: Techno-economic analysis and life cycle assessment. *Chemical Engineering Journal*, 481. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148741>

- López, J. A. (2021). Análisis de la gestión de residuos sólidos en Bogotá: Un enfoque hacia la economía circular.
- Luo, M., Liu, L., Liang, L., Zhang, T., Liu, Y., Sun, J., & Chen, Q. (2024). Artificial intelligence-assisted diagnosis of chronic kidney disease in patients with diabetes: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Biomedical Informatics*, 144, 104621. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2024.104621>
- Maciej Serda, Becker, F. G., Cleary, M., Team, R. M., Holtermann, H., The, D., Agenda, N., Science, P., Sk, S. K., Hinnebusch, R., Hinnebusch A, R., Rabinovich, I., Olmert, Y., Uld, D. Q. G. L. Q., Ri, W. K. H. U., Lq, V., Frxqw, W. K. H., Zklfk, E., Edvhg, L. v, ...)2013. (فاطمى, ح). Synteza i aktywność biologiczna nowych analogów tiosemikarbazonowych chelatorów żelaza. *Uniwersytet Śląski*, 7(1), 343–354. <https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Maga, D., Aryan, V., & Blömer, J. (2023). A comparative life cycle assessment of tyre recycling using pyrolysis compared to conventional end-of-life pathways. *Resources, Conservation and Recycling*, 199, 107255. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2023.107255>
- Magnusson, S., & Mácsik, J. (2017). Analysis of energy use and emissions of greenhouse gases, metals and organic substances from construction materials used for artificial turf. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.03.007>
- Malijonyte, V., Dace, E., Romagnoli, F., Kliopova, I., & Gedrovics, M. (2016). A Comparative Life Cycle Assessment of Energy Recovery from end-of-life Tires and

- Selected Solid Waste. Energy Procedia, 95, 257–264.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.064>
- Manos Verdes. (n.d.). Análisis del ciclo de vida de un producto.
<https://www.manosverdes.co/Analisis-Del-Ciclo-de-Vida-de-Un-Producto/#:~:Text=El%20an%C3%A1lisis%20del%20ciclo%20de%20vida%20de%20un%20producto%2C%20servicio,Producto%2C%20su%20distribuci%C3%B3n%20y%20utilizaci%C3%B3n>.
- Marimin, Darmawan, M. A., Widhiarti, R. P., & Teniwut, Y. K. (2018). Green productivity improvement and sustainability assessment of the motorcycle tire production process: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 191, 273–282.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.228>
- Miranda, Rosa C, Segovia, Ciro C, & Sosa, César A. (2006). Pirólisis de Llantas Usadas: Estudio Cinético e Influencia de Variables de Operación. *Información tecnológica*, 17(2), 7-14. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000200003>
- Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. v., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M. T., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
- Montoya López, L. K. (2021). Avance en la implementación de la Resolución 1326 de 2017 “por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones” En Colombia.
<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/24749>

- Mouneir, S. M., & El-Shamy, A. M. (2024). A review on harnessing the energy potential of pyrolysis gas from scrap tires: Challenges and opportunities for sustainable energy recovery. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 177, 106302. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2023.106302>
- National Geographic. (2019). Neumáticos, gran fuente de contaminación por plástico. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2019/09/neumaticos-gran-fuente-contaminacion-plastico>.
- Oficina de Asuntos Ambientales. (n.d.-a). Gestión integral de residuos en Bogotá. <https://oab.ambientebogota.gov.co/gestion-integral-de-residuos-en-bogota/>.
- Oficina de Asuntos Ambientales. (n.d.-b). Llantas usadas aprovechadas en el distrito capital. <https://oab.ambientebogota.gov.co/llantas-usadas-aprovechadas-en-el-distrito-capital/#info>.
- Oficina de Asuntos Ambientales. (n.d.-c). Número de proyectos realizados d promoción de la economía circular para cerrar el ciclo de vida de los materiales. <https://oab.ambientebogota.gov.co/numero-de-proyectos-realizados-de-promocion-de-la-economia-circular-para-cerrar-el-ciclo-de-vida-de-los-materiales/#info>.
- Ospina, J., & Villada, S. (2011). Métodos para caracterizar combustibles líquidos y gaseosos obtenidos de llantas en desuso a través de las normas ASTM. Lampsakos.
- Pacheco-Torgal, F., Ding, Y., & Jalali, S. (2012). Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles):

- An overview. *Construction and Building Materials*, 30, 714–724.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047>
- PDC Ahome. (n.d.). Modelo AHP: Toma de decisiones mediante su desglose.
<https://www.pdcahome.com/Planificacion/Modelo-Ahp-Toma-de-Decisiones-Mediante-Su-Desglose/>.
- Pei, Y., Han, B., Kumar, D., Adams, S. D., Khoo, S. Y., Norton, M., & Kouzani, A. Z. (2024). Mechanical processes for recycling of End-of-Life Tyres. *Sustainable Materials and Technologies*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01050>
- Peña, W. S., Camargo, G., Garces, S. I., & Villegas, J. D. (2019). Análisis de ciclo de vida de la pirolisis como alternativa de gestión de residuos de llantas usadas: una revisión bibliográfica . Congreso Nacional de Investigación e Innovación Ambiental.
- Pima Llantas. (n.d.). El proceso de reciclaje de llantas y su impacto ambiental.
<https://pimallantas.com/El-Proceso-de-Reciclaje-de-Llantas-y-Su-Impacto-Ambiental/>.
- Plástico. (n.d.). El análisis de ciclo de vida y su importancia para transitar hacia una economía circular. <https://www.plastico.com/es/noticias/el-analisis-de-ciclo-de-vida-y-su-importancia-para-transitar-hacia-una-economia-circular>.
- Rashid, K., Yazdanbakhsh, A., & Rehman, M. U. (2019). Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as medium to low strength material. *Journal of Cleaner Production*, 224, 396–410.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.197>
- Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT). (2023). Boletín de prensa 01 de 2023.

- Ritzen, L., Sprecher, B., Bakker, C., & Balkenende, R. (2023). Bio-based plastics in a circular economy: A review of recovery pathways and implications for product design. *Resources, Conservation and Recycling*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107268>
- Rodríguez, A. M. (2020). Modelación de la calidad del agua en sistemas de abastecimiento de pequeñas poblaciones.
- Rodriguez, L. (n.d.). Análisis de Ciclo de Vida – Guateambiente. <https://www.guateambiente.org/tag/analisis-de-ciclo-de-vida/>
- Ruiz Peña, L. A. (2023). Modelo para la aplicación de economía circular en la producción de llantas basado en el ciclo PHVA. Extraído de: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/45071/RuizPe%c3%b1aLadyAlejandra2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ruiz, E. (2016). El análisis del ciclo de vida. Metodología de decisión y evaluación ambiental en el sector de la edificación.
- Salazar, F., & Silva, C. (2019). El uso de los métodos multicriterio en la evaluación de proyectos: Una revisión de la literatura. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052019000300348.
- Sampaio, D. O. A., Tashima, M. M., Costa, D., Quinteiro, P., Dias, A. C., & Akasaki, J. L. (2022). Evaluation of the environmental performance of rice husk ash and tire rubber residues incorporated in concrete slabs. *Construction and Building Materials*, 357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129332>

Santiago, O., Pinzón, G., Torres, B., Leidy, M., Saavedra, A. R., & Bogotá, D. C. (2018).

INSTRUCTIVO PROGRAMA OPENCLA PRESENTADO POR: LAURA CAROLINA RODRIGUEZ PEÑA PRESENTADO A: ING. JAIRO RAÚL CHACÓN ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO PRODUCCIÓN MAS LIMPIA. <http://www.openlca.org/>

Scientific Assessment of Ozone Depletion. (1998). World Meteorological Organization (1999).

Secretaria de movilidad Bogotá. (2019). Encuesta de movilidad.

Secretaria Distrital de Ambiente. (n.d.). Llantas usadas. <https://www.Ambientebogota.Gov.Co/Llantas-Usadas>.

Secretaría Distrital de Ambiente. (n.d.-a). Guía para el manejo de llantas usadas. <https://www.Ambientebogota.Gov.Co/Documents/10184/506375/Gu%C3%ADa+para+el+manejo+de+llantas+usadas.Pdf/F875a669-7451-47b1-892d-Caf6f8294eb4>.

Secretaría Distrital de Ambiente. (n.d.-b). Guía para el manejo de llantas usadas. <https://www.Ambientebogota.Gov.Co/Documents/10184/506375/Gu%C3%ADa+para+el+manejo+de+llantas+usadas.Pdf/F875a669-7451-47b1-892d-Caf6f8294eb4>.

Seewoo, B. J., Wong, E. V. S., Mulders, Y. R., Goodes, L. M., Eroglu, E., Brunner, M., Gozt, A., Toshniwal, P., Symeonides, C., & Dunlop, S. A. (2024). Impacts associated with the plastic polymers polycarbonate, polystyrene, polyvinyl chloride, and polybutadiene across their life cycle: A review. *Heliyon*, 10(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32912>

- Seppälä, J., M. Posch, M., Johansson, & J. P. Hettelingh. (2006). Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 403–416.
- Sharma, A., Sawant, R. J., Sharma, A., Joshi, J. B., Jain, R. K., & Kasilingam, R. (2022). Valorisation of End-of-Life tyres for generating valuable resources under circular economy. *Fuel*, 314. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.123138>
- Singh, A., Spak, S. N., Stone, E. A., Downard, J., Bullard, R. L., Pooley, M., Kostle, P. A., Mainprize, M. W., Wichman, M. D., Peters, T. M., Beardsley, D., & Stanier, C. O. (2015). Uncontrolled combustion of shredded tires in a landfill - Part 2: Population exposure, public health response, and an air quality index for urban fires. *Atmospheric Environment*, 104, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.002>
- SuperDecisions. (n.d.). SuperDecisions: Herramienta de decisiones. <https://www.superdecisions.com/>.
- Toskano, H. G. (n.d.). Capítulo 3: Metodología del AHP.
- Tsangas, M., Papamichael, I., Loizia, P., Voukkali, I., Salman Raza, N., Vincenzo, N., & Zorpas, A. A. (2024). Life cycle assessment of electricity generation by tire pyrolysis oil. *Process Safety and Environmental Protection*, 186, 376–387. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.038>
- Tsipa, P. C., Phiri, M. M., Iwarere, S. A., Mkhize, N. M., Phiri, M. J., & Hlangothi, S. P. (2024). A novel chemical pre-pyrolysis treatment of waste tyre crumbs: A viable

way for low temperature waste tyre pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 181, 106631. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2024.106631>

UAESP. (2022). UAESP. Residuos Sólidos Especiales y Residuos de Construcción y Demolición.

Una evaluación comparativa del ciclo de vida del reciclaje de neumáticos mediante pirólisis en comparación con las vías convencionales de fin de vida útil - ScienceDirect. (n.d.). Retrieved August 19, 2024, from <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.uamerica.edu.co/science/article/pii/S0921344923003890>

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. (2021). Modelo de aprovechamiento. https://www.uaesp.gov.co/sites/default/files/20210420_Modelo_de_aprovechamiento.pdf.

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. (n.d.-a). Geovisor PGIRS. <https://www.uaesp.gov.co/content/geovisor-pgirs>.

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. (n.d.-b). Reencauche de llantas: alternativa al tratamiento de estos elementos en el distrito. <https://www.uaesp.gov.co/noticias/reencauche-llantas-alternativa-al-tratamiento-estos-elementos-distrito>.

Valentini, F., & Pegoretti, A. (2022). End-of-life options of tyres. A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(4), 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.08.006>

Vargas, R. (n.d.). Analytic hierarchy process (AHP). https://ricardo-vargas.com/articles/analytic-hierarchy-process/#available_files.

- Vera Hostos, A. L. (2016). Estudio experimental del procesamiento de llantas usadas en la producción de biodiésel por medio de transesterificación supercrítica. Extraído de: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/278
- Wang, X., Li, C., Lam, C. H., Subramanian, K., Qin, Z. H., Mou, J. H., Jin, M., Chopra, S. S., Singh, V., Ok, Y. S., Yan, J., Li, H. Y., & Lin, C. S. K. (2022). Emerging waste valorisation techniques to moderate the hazardous impacts, and their path towards sustainability. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127023. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.127023>
- Wu, S., Wang, Z., Guo, S., Cai, Y., Zhang, J., Huangfu, C., Huang, Y., Ma, L., & Zhao, W. (2024). Life-cycle-based reconfiguration of sustainable carbon black production: Integrated conventional technique with waste tire pyrolysis and its future improvement potentials. *Journal of Cleaner Production*, 442, 141022. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.141022>
- Xiao, Z., Pramanik, A., Basak, A. K., Prakash, C., & Shankar, S. (2022). Material recovery and recycling of waste tyres-A review. *Cleaner Materials*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100115>
- Yan, K., Gao, H., Liu, R., Lyu, Y., Wan, M., Tian, J., & Chen, L. (2024). Review on low-carbon development in Chinese industrial parks driven by bioeconomy strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114541>
- Yilmaz, A., & Degirmenci, N. (2009). Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials. *Waste Management*, 29(5), 1541–1546. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2008.11.002>

- Zeilerbauer, L., Lindorfer, J., Fuchs, P., Knöbl, M., Ravnås, A., Maldal, T., Gilje, E., Paulik, C., & Fischer, J. (2024). Quantifying the Sustainability of Football (Soccer) Pitches: A Comparison of Artificial and Natural Turf Pitches with a Focus on Microplastics and Their Environmental Impacts. *Sustainability (Switzerland)* , 16(8). <https://doi.org/10.3390/SU16083487>
- Zerin, N. H., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., & Sayem, A. S. M. (2023). End-of-life tyre conversion to energy: A review on pyrolysis and activated carbon production processes and their challenges. *Science of The Total Environment*, 905, 166981. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.166981>
- Zhang, M., Qi, Y., Zhang, W., Wang, M., Li, J., Lu, Y., Zhang, S., He, J., Cao, H., Tao, X., & Xu, H. (2024). A review on waste tires pyrolysis for energy and material recovery from the optimization perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2024.114531>