



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**RECUPERACIÓN DEL NEGRO DE CARBONO  
PROVENIENTE DE LLANTAS MEDIANTE EL  
TRATAMIENTO DE PIRÓLISIS COMO ESTRATEGIA DE  
PROMOCIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN  
COLOMBIA**

**Welcy Zaray Buitrago Grisales**

**Universidad de Antioquia**

**Escuela Ambiental, Facultad de ingeniería**

**Medellín, Colombia**

**2020**



Título del Trabajo

Recuperación del negro de carbono proveniente de llantas mediante el tratamiento de pirólisis como estrategia de promoción de la economía circular en Colombia

**Welcy Zaray Buitrago Grisales**

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Especialista en Gestión Ambiental**

Asesor(a):

Faber Esteban Gil Acosta

Ingeniero Sanitario

Universidad de Antioquia

Escuela Ambiental, Facultad de ingeniería

Medellín, Colombia

2020

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general .....	4
1.2.2 Objetivos específicos: .....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Fabricación de llantas .....	5
2.1.1. Composición de las llantas .....	6
2.1.2. Partes de la llanta.....	7
2.2. Procesos de transformación del caucho proveniente de llantas.....	9
2.3. Negro de carbono comercial.....	12
2.4. Negro de carbono recuperado.....	14
2.5. Economía circular.....	14
2.5.2. Economía circular aplicada en llantas de desecho .....	18
2.6. Normatividad asociada al aprovechamiento de llantas.....	18
3. RECUPERACIÓN DEL NEGRO DE CARBONO PROVENIENTE DE LLANTAS MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE PIRÓLISIS COMO ESTRATEGIA DE PROMOCIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN COLOMBIA.....	24
3.1. Pirólisis .....	24
3.2. Obtención de negro de carbón recuperado o Negro de humo recuperado (CBr) .....	25
4. METODOLOGÍA .....	31
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	33
6. CONCLUSIONES .....	34
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Composición promedio de una llanta % en peso .....	6
Tabla 2: Comparación de los procesos de pirólisis .....	11
Tabla 3 Tipos de negro de carbón usado en neumáticos .....	13

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Almacenamiento de llantas.....	2
<b>Figura 2.</b> Partes de una llanta de carro .....	7
<b>Figura 3.</b> Partes de una llanta de moto .....	7
<b>Figura 4:</b> Tamaño de llantas.....	8
<b>Figura 5.</b> Niveles en los cuales se muestran los procesos que se aplican a las llantas para su reciclaje. ....	9
<b>Figura 6.</b> Diagrama deflujo del proceso de la pirolisis .....	10
<b>Figura 8.</b> Listado de productos abordados por la Ley REP y que estarán sujeto a metas de recolección y valorización.....	22

## GLOSARIO

**Aprovechamiento de llantas usadas.** Proceso mediante el cual se recuperan los materiales por medio de la reutilización, el reciclaje y valorización energética, con el fin de reincorporarlos en el ciclo económico y productivo.

**Cenizas:** Trazas de compuestos inorgánicos que quedan junto al negro de carbono recuperado en un proceso de pirólisis, principalmente de los aditivos implementados en la fabricación de la llanta.

**Llanta desechada:** Toda llanta que ha finalizado su vida útil y se ha convertido en residuo sólido.

**Negro de carbono comercial:** Carbono elemental parcialmente puro en forma de partículas coloidales que son producidas por la combustión parcial o la descomposición térmica de hidrocarburos gaseosos o líquidos en condiciones controladas.

**Negro de carbono recuperado (CBr):** Parte sólida y negra derivada de proceso de pirolisis.

**Pirólisis:** Fenómeno fisicoquímico donde se produce la descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y en presencia de un gas de arrastre.

**Vulcanización:** Proceso en el cual las cadenas proliméricas de los cauchos son entrelazadas con moléculas de azufre bajo condiciones de alta presión y temperatura.

## RESUMEN

El presente trabajo de monografía, analiza información relacionada con las características físicas y químicas que componen las llantas, sus partes y clasificaciones de acuerdo a su composición, las principales problemáticas ambientales derivadas de la alta generación e inadecuada disposición final de este tipo de residuo. La necesidad de contrarrestar los impactos negativos ha desencadenado o promovido la generación de diverso métodos que permitan la transformación y el aprovechamiento del caucho generado por estas llantas, una de esas transformaciones es conocido como Pirolisis, el cual es un “Fenómeno fisicoquímico donde se produce la descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y en presencia de un gas de arrastre”, de este se generan 3 subproductos, una sección líquida, una gaseosa y una sólida, esta última conocida como negro de carbono recuperado o negro de humo, en el cual se centra este trabajo. A través de diferentes investigaciones se exponen los usos logrados con el negro de carbono recuperado (CBr) por ejemplo, como sustituto al negro de carbono comercial en fabricación de llantas, como removedor de contaminantes y como carbón activado. Finalmente, la reincorporación de estos subproductos a nuevos procesos productivos promueve uno de los objetivos de la metodología de economía circular al propender por un cambio en la estructuración económica del sistema lineal a uno que disminuye o radica cualquier salida (residuo dispuesto en un relleno sanitario o celda de seguridad) del sistema consolidando así la estructura cíclica que caracteriza a esta metodología.

**Palabras clave:** Pirólisis, economía circular, negro de carbono recuperado, aprovechamiento de negro de carbono

## ABSTRACT

The present work shows information related to the physical and chemical characteristics that compose the tires, their parts and classifications according to their composition, the main environmental problems derived from the high generation and inadequate final disposal of this type of waste. The need to counteract the negative impacts has triggered or promoted the generation of diverse methods that allow the transformation and use of the rubber generated by these tires, one of these transformations is known as pyrolysis, which is a "Physicochemical phenomenon where the thermal decomposition of organic matter occurs in the absence of oxygen and in the presence of a carrier gas", from which 3 by-products are generated, a liquid section, a gaseous section and a solid section, the latter known as recovered carbon black or carbon black, on which this work is focused. Through different researches, the uses achieved with the carbon black recovered (CBr) are exposed, for example, as a substitute to the commercial carbon black in manufacture of tires, as pollutant remover and as activated carbon. Finally, the reincorporation of these by-products to new productive processes promotes one of the objectives of the circular economy methodology by promoting a change in the economic structure of the linear system to one that decreases or roots any output (waste disposed of in a sanitary landfill or safety cell) of the system, thus consolidating the cyclical structure that characterizes this methodology.

**Keywords:** Pyrolysis, circular economy, reclaimed carbon black, carbon black utilization.



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

El invento de la llanta ha traído consigo múltiples beneficios para el desplazamiento de las personas y el transporte de mercancías, si bien este invento ha pasado por varias modificaciones (de madera a metal y de metal a caucho), no fue sino hasta el año 1839 cuando Charles Goodyear descubrió el proceso de vulcanización (Continental, s.f), el cual, le da las características de firmeza y maleabilidad a las llantas que hoy conocemos, sin embargo, la implementación de llantas en la mayoría de medios de transporte tiene como daño colateral la generación de llantas como residuo. Para la Asociación Europea de Fabricantes de Neumáticos y Caucho, Bruselas, Bélgica (ETRMA por sus siglas en inglés), cada año se producen 1,500,000,000 de llantas en todo el mundo que eventualmente terminarán como llantas de desecho (Etrma, 2011). Para el caso de Colombia. Peláez, Velásquez y Giraldo en el 2017 exponen que en el año 2015 se generaron alrededor de 100 mil toneladas de caucho provenientes de este residuo (Peláez et al., 2017).

La eliminación de las llantas representa uno de los grandes retos a nivel mundial, no solo por el alto volumen generado (figura 1) sino por las características intrínsecas de estas (durabilidad, resistencia a fricción, bajo nivel de degradabilidad), las que en un inicio las hacen deseables y funcionales luego dificultan cualquier tipo de aprovechamiento. Por otra parte, la inadecuada disposición final desencadena una serie de impactos negativos para la salud y el ambiente, los principales son, la reducción de la vida útil de los rellenos sanitarios, propagación de vectores, generación de toxinas por incendios y debido al alto costo de la eliminación legal, se aumenta la inadecuada disposición (Martínez et al., 2013).



**Figura 1.** Almacenamiento de llantas  
Fuente: elaboración propia

La problemática de fondo de este tipo de residuo (caucho) y de muchos otros se deriva desde la concepción misma de nuestro modelo de producción, donde este, se estructura de forma lineal, consistiendo en (Arroyo et al., 2018) “la extracción de materias primas, la producción de bienes, el consumo y la generación de residuos”. (p.140). Esta estructura ha generado que el sector industrial se enfoque netamente en la generación de productos sin tener presente el origen de sus materias primas, ni la cantidad ni el destino final de sus residuos. Una apuesta para cambiar este tipo modelo consiste en la economía circular, modelo que propone un cambio en el sector industrial y en el estilo de consumo, fortaleciendo sistemas restaurativos y regenerativos con el fin de disminuir el consumo de materia primas y la generación de residuos (Arroyo et al., 2018). Para el caso de las llantas desechadas, este modelo proyecta un panorama prometedor en la disminución de los diferentes impactos negativos ocasionados por este tipo de residuo al reincorporar el negro de carbono recuperado a nuevos procesos producción.

Teniendo presente que el caucho corresponde alrededor del 41- 45% de la llanta (sin contar con el 20 al 28 % del negro de carbono añadido en su fabricación) (Sienkiewicz et al., 2012), muchas investigaciones han estado enfocadas en identificar posibles transformaciones físicas, químicas o mixtas de este residuo, una de ellas es la pirólisis, la cual consiste en la degradación térmica de los componentes orgánicos del caucho, a unas temperaturas que oscilan alrededor de los 500 °C para producir tres (3) productos, un combustible líquido, una mezcla de gases y un sólido carbonoso conocido como negro de carbón recuperado (Williams, 2013), en el cual se centrará este trabajo.

Entendiendo la problemática ambiental mencionada en párrafos anteriores y reconociendo también que existen diferentes mecanismos de transformación física y química para el caucho generado por la llantas desechadas, se puede pensar que la limitante para dar solución a la problemáticas del residuo no es la transformación del caucho, si no que no se ha logrado adoptar una estrategia que permita o promueva dentro del sector productivo la incorporación de los subproductos generados, dado esto, con este trabajo se pretende soportar de forma argumentativa la siguiente pregunta: ¿Será posible promover la economía circular a través de la reincorporación del negro de carbono recuperado-CBr (obtenido del proceso de pirolisis), en nuevos procesos productivos y de este modo disminuir las problemática ambiental que este residuo genera?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Revisar las alternativas de reincorporación del negro de carbono proveniente del proceso de pirólisis en procesos productivos, como estrategia de promoción para una economía circular.

### **1.2.2 Objetivos específicos:**

Identificar los avances técnicos y tecnológicos, relacionados con la fabricación de negro de carbono recuperado proveniente de la pirólisis en llantas por medio de revisión de material bibliográfico.

Analizar las características físicas y químicas del negro de carbono recuperado proveniente de la pirólisis en llantas y el negro de carbono comercial para identificar el grado de disimilitud entre ellos.

Reconocer los usos actuales del negro de carbono recuperado en procesos productivos a través de análisis de información técnica, para identificar las alternativas de reincorporación de este material.

Describir la correlación entre la economía circular y la reincorporación del negro de carbono proveniente de la pirólisis en llantas en nuevos procesos productivos.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Fabricación de llantas

Se suele pensar que la fabricación de una llanta consta de la unión de caucho, alambre y lona, sin embargo, este contexto es demasiado vago con relación a todos los procesos que conlleva la fabricación de estas.

Para entender la diversidad de insumos que se requieren para su fabricación, basta con analizar las funciones que estas deben cumplir, resistencia a continuas malformaciones, aguantar el daño ocasionado por la luz solar, el oxígeno, las grasas y los aceites, soportar pesadas cargas y a su vez, rendir un número considerable de kilómetros. Con el fin de garantizar cada una de las anteriores características la industria ha tenido que reincorporar una diversidad de insumos que permitan garantizar su funcionalidad.

Entre los insumos más implementados en la fabricación de una llanta, tenemos (Carrión, 1999):

- Granulo fino de Negro de carbono (Negro de humo). Añade consistencia y dureza.
- Cementos y pinturas. Para la construcción y el acabado.
- Fibras de Rayón y Acero. Para fortalecer la llanta.
- Caucho sintético o natural. Materiales principales en la fabricación.
- Antioxidantes y antiozonantes. Para resistir los efectos dañinos de la luz solar y del ozono, para hacer que la llanta tenga mayor durabilidad.
- Aceites y grasas. Para hacer más maleable la mezcla y para ayudar en el mezclado de todos los ingredientes.

Además, se agregan otros materiales al caucho para mejorar sus propiedades, tales como: suavizantes, que aumentan la trabajabilidad del caucho, antes de la vulcanización; óxido de Zinc y de Magnesio, comúnmente denominados activadores, pues son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias a horas a pocos minutos (Castro, 2008).

### 2.1.1. Composición de las llantas

De acuerdo con lo expuesto por la Asociación Europea de Fabricantes de Neumáticos y Caucho (ETRMA, en sus siglas en inglés) y (Williams, 2013), la composición de una llanta dependerá del tipo de uso que esta vaya a tener, como se expone en la tabla 1.

Tabla 1:  
*Composición promedio de una llanta % en peso.*

<b>Ingrediente</b>	<b>Elastómeros de goma (caucho)</b>	<b>Negro carbón</b>	<b>Metal</b>	<b>Textil</b>	<b>Óxido de zinc</b>	<b>Otros (aditivos)</b>
<b>Pasajeros</b>	47- 48	21,4	15,6- 16,5	5.5	1	8.5
<b>Camión</b>	45	21,5 - 22	23	3	2	5.5
<b>Trocha</b>	47	22	12	10	2	7.7

Fuente: Construcción basada en ETRMA 2019 y (Williams, 2013).

Para la fabricación de las llantas se emplean diferentes tipos de caucho tanto sintético como natural, por ejemplo, el caucho de estireno-butadieno (Jain, 2016), caucho butílico (Sienkiewicz et al., 2012) (Jain, 2016), el caucho natural (polisopreno), el caucho de nitrilo, el caucho de cloropreno (Williams, 2013), el caucho de polibutadieno (Sagar et al., 2018).

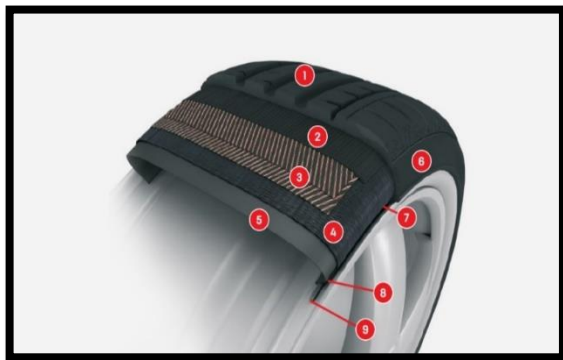
El caucho natural es obtenido del árbol *Hevea Brasiliensis* que genera un látex con partículas de caucho en suspensión y el caucho sintético que es derivado de hidrocarburos, si bien todos los cauchos tienen diferentes características comparten el hecho de que luego de ser vulcanizados logran su convertirse en un material rígido y duradero, frente al tema Castro expone que:

“En el proceso de vulcanizado, en la fabricación del neumático, la goma virgen es mezclada con otros productos (cauchos sintéticos, azufre y óxidos) y llevada a

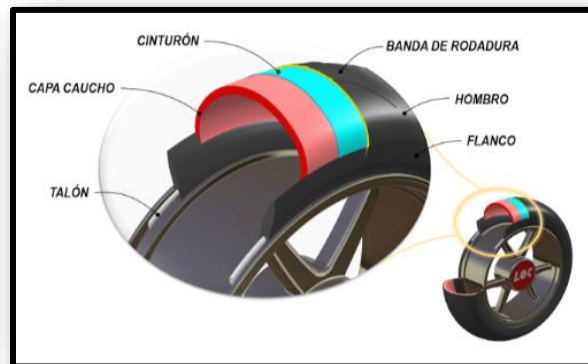
temperaturas que provocan cambios en su estructura química interna y en sus propiedades físicas. Estos cambios son, en la práctica, irreversibles” (Castro, 2008).

### 2.1.2. Partes de la llanta.

Una llanta está conformada por diferentes partes, cada una con una composición específica para cumplir con un rol a la hora de su implementación, ya sea facilitando su agarre, el mantenimiento de la forma o la estabilidad direccionamiento (figura 2a).



**Figura 2.** Partes de una llanta de carro  
Fuente: (Uniroyal, n.d.)



**Figura 3.** Partes de una llanta de moto  
Fuente: (Loctite Teroson, n.d.)

1. Banda de rodadura. 2. Lonas de cima sin fin. 3. Cable de acero para lonas del cinturón. 4. Lona de cables textiles. 5. El calandraje interior. 6. El flanco 7. El refuerzo del talón. 8. Punta de talón. 9. Núcleo del talón (UNIROYAL, n.d.).

Actualmente en el país se comercializan dos tipos de llantas, la clasificación está dada por el tipo de material con el que se encuentra construido el cinturón de la llanta, si este es de lona la llanta es denominada convencional, pero si este es en acero es denominada radial. La principal característica en esta diferencia es que el neumático al tener un cinturón de acero puede soportar

mayor cantidad de peso, por lo que se vuelve ideal en el uso de camiones y tractocamiones, sin embargo, el peso de la llanta es mayor al de una convencional, lo que hace que varíe la cantidad de llantas que pueden transportarse en un mismo vehículo, esta información es soportada bajo mi experiencia personal.



**Figura 4:** Tamaño de llantas  
**Fuente:** Maxxis, 2018

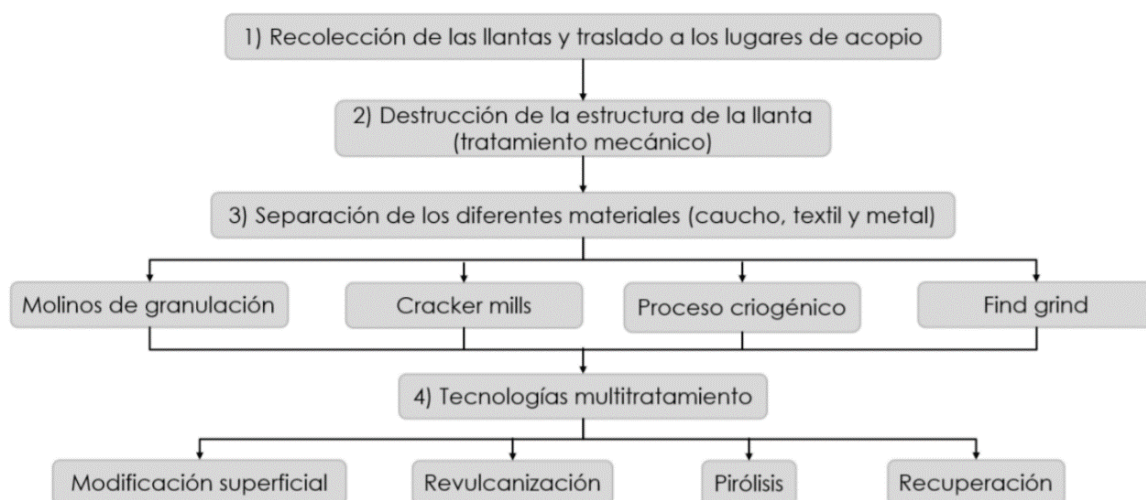
Como se mencionó al inicio de la monografía, las llantas son implementadas en otros tipos de vehículos como motocicletas y bicicletas, lo que significa que la problemática ambiental de este residuo también es desencadenada por este tipo de llantas. Frente a características físicas y químicas entre estos dos tipos de llantas (carro y de moto) tiene puntos de convergencia y divergencia, desde sus características física las llantas de motos y bicicletas están diseñadas para lograr un grado de inclinación mayor con relación a las llantas para un carro, sin embargo, las partes que las conforman son iguales entre una llanta de carro radial y una llanta para moto (ver Figura 3), desde una mirada de sus características químicas, la literatura no segrega entre los insumos requeridos para la fabricación de llantas de carros o motos (Serrano, 2017), sin embargo, considero que al igual que la fabricación entre distintos tipos de llantas de carro la variación está en las cantidades o concentraciones de materia prima requeridas en su fabricación, ver tabla 1, por lo que la solución a esta incógnita deberá ser resuelta en otra investigación.

Luego de conocer todas las características físicas y químicas de una llanta, se continuará con los procesos que permiten su transformación, teniendo como enfoque principal el tratamiento de la pirolisis.



## 2.2. Procesos de transformación del caucho proveniente de llantas

Las llantas pueden ser desechadas por presentar un desgaste en su banda de rodadura o por presentar alguna falla estructural (malformación, hinchazón o ruptura de sus lonas) que comprometa o impida su funcionamiento. Al convertirse en residuo, este presenta una característica de baja o nula degradación por lo que se hace necesario realizar procesos que permitan la transformación y posteriormente su aprovechamiento. En la figura 5 se exponen algunos tipos de transformaciones física o química del caucho, entre los que se evidencia el proceso objeto de análisis de esta monografía “la pirólisis”.



**Figura 5.** Niveles en los cuales se muestran los procesos que se aplican a las llantas para su reciclaje.

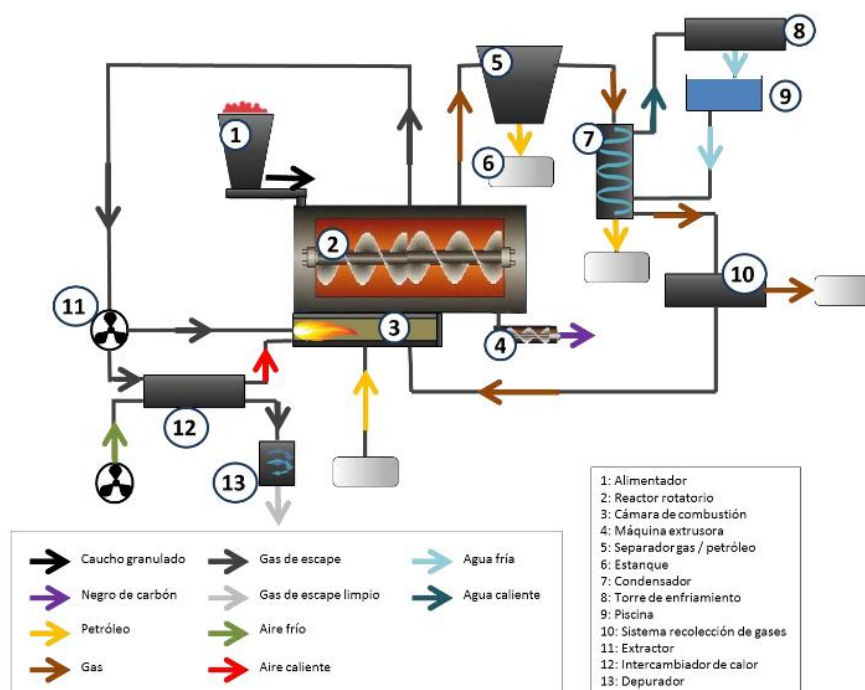
**Fuente:** (Serrano, 2017).

La pirólisis es un fenómeno fisicoquímico donde se produce la descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y en presencia de un gas de arrastre ( $N_2$ , helio,  $CO_2$ <sup>1</sup>) (Rivera et al., 2016), en este caso, la degradación térmica de caucho proveniente de las llantas en desuso, en la cual se obtienen tres (3) productos de menor peso molecular que el caucho, un sólido carbonoso conocido como negro de carbono o negro de humo, un combustible líquido

<sup>1</sup> Implementado en pirólisis de llantas

conformado principalmente de compuestos aromáticos y alifáticos conocido como fracción líquida y una mezcla no condensable de gases, conocida como fracción gaseosa (Martínez et al., 2013).

El proceso de pirólisis se lleva a cabo por medio de diferentes sistemas que permiten la degradación térmica del caucho de los neumáticos de desecho, algunos de estos mecanismos son: lechos fluidizados, las cámaras de parrilla móvil, los hornos rotativos, las retortas, las sales fundidas, los baños de aceite caliente, las unidades de arco de plasma y las cámaras de microondas (Jain, 2016), estos sistemas tienen como equipo principal un reactor (figura 6), el cual permite tener control de todas las condiciones operacionales requeridas, entre ellas se destaca el control de la temperatura, presión, regulación de los fluidos, tiempo de residencia, entre otros.



**Figura 6.** Diagrama de flujo del proceso de la pirólisis

Fuente: (Tirel, 2017)

El proceso de pirólisis se clasifica dependiendo de cómo se aporta el calor al reactor, en sistemas alotérmicos o sistemas autotérmicos, en el primero la conducción y transmisión de calor se da de forma indirecta (a través de las paredes) y en el segundo de forma directa (la energía es proporcionada por la reacción de material pirolizado) (Xavier & Velo, 2012). Otra clasificación de la pirólisis está determinada por la temperatura ejercida al momento de realizar descomposición, ver tabla 2 (Xavier & Velo, 2012).

Los tratamientos térmicos como la pirolisis a bajas temperaturas (300 - 450 °C) suelen favorecer la formación de partículas de negro de carbón, mientras que las temperaturas medias (450-600 °C) favorecen la formación de productos líquidos (aceites). Las temperaturas más altas (>600 C) tienden a generar productos principalmente gaseosos. Estos factores afectan a las propiedades (tamaño, composición, aglomeración) del producto (Parthasarathy et al., 2016).

Tabla 2:  
*Comparación de los procesos de pirólisis*

<b>Proceso</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>Velocidad de calentamiento</b>	<b>Producto mayoritario</b>
<b>Convencional</b>	500	2	Carbón y Condensables
<b>Rápida</b>	400 a 800	>2	A temperaturas moderadas 500 °C, condensables
<b>Instantánea</b>	>600	>200	Gases e hidrocarburos ligeros

Fuente: Tabla elaborada con base en (Xavier & Velo, 2012).

Si bien el proceso de pirólisis genera tres subproductos, este trabajo se enfocará en la parte sólida generada, denominada negro de carbono recuperado o CBr por sus siglas en inglés (Recovered Carbon Black). Se debe tener presente que en la fabricación de las llantas una de las principales materias primas es el negro de carbono comercial.

### 2.3. Negro de carbono comercial

De acuerdo con la Asociación internacional de negro de carbón (ICBA), el negro de carbono o negro de humo es un carbón elemental parcialmente puro en forma de partículas coloidales que son producidas por la combustión parcial o la descomposición térmica de hidrocarburos gaseosos o líquidos en condiciones controladas. Su apariencia física es la de un polvo negro o gránulos negros finamente divididos y clasificados según su tamaño y pureza. Desde una mirada microscópica tiene una forma de carbono amorfo con una relación superficie-volumen extremadamente alta y que, como tal, es uno de los primeros nano-materiales ampliamente usados (Castro, 2008).

El negro de carbono es implementado en la fabricación de llantas dado a que incrementa las propiedades mecánicas como la tenacidad, la resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste en el caucho (Serrano, 2017), otros usos están asociados a la fabricación de tintes y en tratamientos de aguas como carbón activado (Rivera et al., 2016), sin embargo, este material tiene su lado negativo al considerarse carcinógeno y al dañar el tracto respiratorio al ser inhalado, debido a su alto contenido en hidrocarburos policíclicos aromáticos (Castro, 2008).

De acuerdo a la investigación Materiales y Compuestos para la Industria del Neumático, elaborada por el ingeniero Castro (2008), el uso más común (70%) del negro de carbón es como pigmento y base de refuerzo en neumáticos para automóviles. El negro de carbón también ayuda a disipar el calor de las zonas de la huella y el cinturón del neumático, reduciendo el daño térmico e incrementando la vida de la goma. Las partículas de negro de carbón también se emplean en algunos materiales absorbentes de radar y en los tóners de impresoras y cerca del 20% de la producción mundial se emplea en cinturones, mangueras y otros artículos de goma. El resto se usa en tintas y como pigmento para otros productos diferentes de neumáticos. A continuación, en la figura 6 se muestran algunos de los tipos de negro de carbón usado en neumáticos:

Tabla 3  
Tipos de negro de carbón usado en neumáticos

Nombre	Abrev.	Desig. ASTM	Tamaño partícula (nm)	Fuerza ténzil (MPa)	Abrasión relativa en lab.	Abrasión relativa en carret.
Super Abrasion Furnace	SAF	N110	20-25	25 ,2	1,35	1,25
Intermediate SAF	ISAF	N220	24-33	23 ,1	1,25	1,15
High Abrasion Furnace	HAF	N330	28-36	22 ,4	1,00	1,00
Easy Processing Channel	EPC	N300	30-35	21 ,7	0,80	0,90
Fast Extruding Furnace	FEF	N550	39-55	18 ,2	0,64	0,72
High Modulus Furnace	HMF	N683	49-73	16 ,1	0,56	0,66
Semi-reingorcjing Furnace	SRF	N770	70-98	14 ,7	0,68	0,60
Fine Thermal	FT	N880	180-200	12 ,6	0,22	-
Medium Thermal	MT	N990	250-350	9, 8	0,18	-

Fuente: (Castro, 2008)

## **2.4. Negro de carbono recuperado**

El negro de carbono recuperado o negro de humo es un sólido de color negro con características similares al negro de carbono comercial, obtenido a través de la pirólisis del caucho proveniente de llantas en desuso o de otros componentes con alto contenido de carbono. Este contiene trazas o cenizas de ZnO y S (Lopez et al., 2008) provenientes de los aditivos adicionados al momento de la fabricación de la llanta.

El negro de carbono recuperado, al igual que todos los productos fabricados, busca solucionar un problemática o una necesidad, en este caso busca disminuir la cantidad de llantas presentes en los ecosistemas, se espera, que el producto promueva la transformación de una economía lineal a una economía circular, al lograr reincorporarse en nuevos procesos productivos, por ejemplo, de acuerdo con Sagar et al (2018) se puede usar como relleno de negro de carbón o como combustible sólido y se puede actualizar para producir carbón activado.

A continuación, se profundizará en los componentes básicos de la metodología de Económica circular, necesarios para realizar la correlación entre dicha metodología y la reincorporación del negro de carbono proveniente de la pirólisis en llantas en nuevos procesos productivos, con el fin de soportar que a través de la reincorporación del negro de carbono hay una promoción en economía circular.

## **2.5. Economía circular**

El término Economía circular se utilizó por primera vez en la literatura occidental en la década de 1980 de acuerdo a lo presentado por Murray, Skene & Haynes, (2017), esta se enfoca en describir un sistema cerrado de interacciones economía-medio ambiente.

La economía circular consiste en la reutilización de los productos, los materiales y los recursos, a fin de que se reduzca al mínimo la generación de residuos y el uso de materias vírgenes en la producción de bienes (Cáceres et al., 2019). Esta también permite responder a los desafíos del crecimiento económico productivo actual porque promueve un flujo cíclico para la extracción, transformación, distribución, uso y recuperación de los materiales y la energía de productos y servicios disponibles en el mercado (Park et al., 2010).

Por otra parte, la economía circular tiene como enfoque pasar de un modelo de sistema económico lineal a uno circular, a través de la reincorporación de residuos a nuevos procesos productivos, la generación de resiliencia de las empresas, promover el uso de energías renovables y buscar un enfoque de sistema global (todos los procesos de fabricación o prestación de un servicio están conectados).

De acuerdo con Lett (2014), el concepto de economía circular se apoya en los fundamentos de la escuela ecologista, y propone un cambio al paradigma “reducir, reutilizar y reciclar” con el objetivo de disminuir el impacto producido por las actividades humanas sobre el medio ambiente. Bajo este enfoque, el residuo pierde su condición inservible y se transforma para formar parte de nuevos productos tecnológicos, con un menor gasto de agua y energía (Lett, 2014).

De acuerdo con González y Vargas (2017) los principales principios de la economía son:

- Eco-concepción: considera los impactos medioambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto y los integra desde su concepción.
- Reducción de materiales: elaboración de productos con la menor cantidad de materiales y energía, modelo que permite la protección de los recursos y reduce las emisiones al ambiente.
- La economía de la “funcionalidad”: privilegiar el uso frente a la posesión, la venta de un servicio frente a un bien.
- Segundo uso: reintroducir en el circuito económico aquellos productos que ya no se

corresponden a las necesidades iniciales de los consumidores.

- Durabilidad: productos respetuosos con el medio ambiente con una mayor vida útil.
- Reparación: encontrar una segunda vida a los productos estropeados.
- Reciclaje: aprovechar los materiales que se encuentran en los residuos.
- Valorización: aprovechar energéticamente los residuos que no se pueden reciclar.
- Uso de tecnología: mejora la eficiencia de los productos que permite realizar un diseño sostenible.

Para ejemplificar la implementación de esta metodología, se expone la investigación de Gracia, Pérez y Escalera (2020), la cual tiene como objetivo analizar la efectividad de la reutilización de agua, como estrategia de economía circular, para reducir la presión sobre los recursos hídricos tradicionales y contribuir así a mitigar los efectos del cambio climático, teniendo como uno de sus resultados que la reutilización tiene el potencial para contribuir a la sostenibilidad del agua, tal y como demuestra el hecho de que en los usos municipales, un mayor volumen de agua reutilizada implica una menor captación de agua de otras fuentes (Gracia et al., 2020).

Otro caso en el cual se desarrolla la metodología de economía circular es el expuesto por Zamora, Blanco y Hinojosa (2019), en este describen que las operaciones mineras, en el marco de la economía lineal, han generado grandes volúmenes de desmontes o estériles con bajos contenidos de los metales de interés económico, sin embargo, desde una mirada de la economía circular, los sitios de almacenamiento de desmontes generadores de drenaje ácido de roca, pueden ser objeto de tratamiento metalúrgico, con el propósito de recuperar dichos metales de interés económico por procesos hidrometalúrgicos y de esta forma generar alternativas de tratamiento y obtención de metales que permitan el cierre ambiental de los desmontes, con beneficios tanto económicos como ambientales (Zamora et al., 2019).

### **2.5.1. Colombia y la Economía Circular**



El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en su estrategia nacional de Economía Circular - **ENEC** del 2019, la define como un sistema de producción y consumo que promueve la eficiencia en el uso de materiales, agua y la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales a través la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores, y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible (Saer, 2019).

Esta estrategia es uno de los vehículos centrales para cumplir con las metas del Crecimiento Verde, aumentando la tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos a nivel nacional hasta el 17,9%, y de reducir los gases efecto invernadero en un 20% en el año 2030. (Gobierno de la Republica de Colombia, 2019).

Colombia a través de la ENEC se integra a la tendencia global de buscar una transición hacia un aumento en la calidad de vida utilizando menos recursos. Dicha estrategia está dirigida a:

- Empresas cuya actividad económica sea parte de las cadenas productivas asociadas a agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca; explotación de minas y canteras, industrias manufactureras, suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado; distribución de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales, gestión de desechos y actividades de saneamiento; construcción, comercio, transporte, alojamiento y servicios de comida, actividades financieras y de seguros, actividades de atención a la salud, entre otras.
- Importadores y fabricantes de productos de consumo masivo que, en razón a sus características, volumen de generación como residuos y posible impacto ambiental asociado a su manejo de final de vida inadecuado, requieren de una gestión posconsumo en aplicación del principio de la responsabilidad extendida del productor.
- Exportadores de productos y servicios con criterios de sostenibilidad ambiental y social.
- Entre otro.

### **2.5.2. Economía circular aplicada en llantas de desecho**

De acuerdo a las lecturas realizadas para la elaboración de la presente monografía, considero que una aplicación importante del término de economía circular se puede presentar en las llantas en desuso, mediante estrategias encaminadas a reincorporar subproductos derivados de la transformaciones físico-químicas de las llantas en nuevos procesos productivos, fortalecer tecnologías que permitan la extracción de subproductos con mayor valor energético y promover comercios entorno a dichos productos, generando así un flujo económico cerrado.

Asimismo, el diseño de las llantas debe tener en cuenta los principios de la ingeniería ecológica, cuyo objetivo es desarrollar nuevos materiales y reemplazar los clásicos, por ejemplo, por negro de carbono recuperado (CBr) de modo que tanto los procesos tecnológicos de fabricación de las llantas como los de su uso garanticen condiciones óptimas para la salud humana y el medio ambiente (Dobrotă et al., 2020).

Este enfoque de economía circular viene apoyado de forma directa e indirecta por un marco normativo ambiental que fomenta alternativas que permitan disminuir la cantidad de llantas desechadas en los ecosistemas.

### **2.6. Normatividad asociada al aprovechamiento de llantas**

Con el fin de conocer a grandes rasgos las estrategias encaminadas a disminuir las problemáticas ambientales desencadenadas por las llantas en desuso a nivel mundial, se toma como referencia algunas de las políticas que promueven el manejo y gestión de este tipo de residuo.

## **EUROPA**

## **Unión Europea**

Directiva 1999/31/EC, relativa al vertido de residuos, expresa en su numeral 3 del artículo 5, que las llantas enteras no serán recibidas en el vertedero, posteriormente, mediante el Real Decreto 1481 de 2001, en su literal d, numeral 3 de su artículo 5, ratifica el artículo antes mencionado y adiciona, que, a partir del 16 de julio de 2006, no se recibirán llantas usadas troceadas en los vertederos.

## **NORTE AMÉRICA**

### **EEUU**

Para el caso de los Estados Unidos, debido a su modelo de Estado federal cada estado tiene la autonomía de decretar o no normatividad frente al aprovechamiento o disposición final de las llantas fuera de uso, para este trabajo traemos como ejemplo normatividad del Estado de Indiana.

#### *Indiana General Assembly*

##### *Title 13, Environment*

##### *Article 20. Solid waste management;*

##### *Chapter 13 Regulation of Waste Tire Storage Sites; Waste Tire Management Fund*

##### *Chapter. 14. Disposal of Waste Tires*

Del capítulo 13 se resalta la sección 9 Fondo de gestión de neumáticos de desecho; uso de fondos:

- El Estado puede usar dinero del fondo para ayudar en:
  - Retirar las llantas de desecho de los sitios donde las llantas de desecho se desecharon de manera incorrecta;
  - Manejo adecuado de llantas de desecho;
  - Realizar actividades de vigilancia y aplicación de la ley utilizadas para implementar un manejo adecuado de llantas de desecho; y

- Llevar a cabo el programa de educación sobre llantas de desecho bajo la sección 15 de este capítulo.
- El departamento puede usar el dinero del fondo para otorgar subvenciones y préstamos a entidades para establecer y operar programas que involucren lo siguiente:
  - Reciclaje o reutilización de llantas de desecho.
  - Uso de llantas de desecho como fuente de combustible.
  - Mercados en desarrollo para llantas de desecho y productos que contienen llantas de desecho recicladas o reutilizadas.

Del Capito 14 se resaltan 13 de sus 14 secciones, las cuales están ligadas con la Eliminación de neumáticos usados:

- Eliminación en vertederos de residuos sólidos
- Avisos en establecimientos minoristas de neumáticos
- Aceptación de llantas de desecho por minoristas en venta de llantas nuevas
- Eliminación por fuente de llantas de desecho
- Transportadores de neumáticos de desecho; registro; formas manifiestas; Tarifa; retención y suministro de copias del manifiesto
- Retención y disponibilidad de manifiestos
- Revocación o modificación del certificado de registro; apelación
- Remoción y acciones correctivas
- Recuperación de costes y daños
- Eliminación por operadores de estaciones de transferencia
- Eliminación en una operación de extracción de minerales

Información obtenida de (Indiana General Assembly website, n.d.)

## **SURAMERICA**

### **Chile**

- Real Decreto sobre Gestión de Neumáticos Fuera de Uso (NFU)

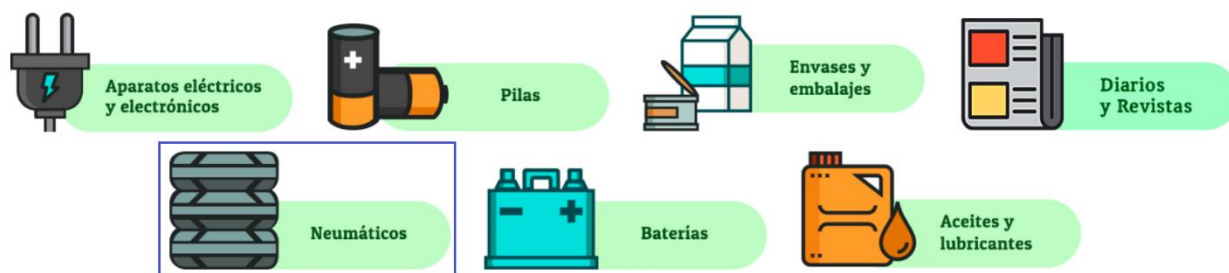
El 30 de diciembre de 2005 fue aprobado el Real Decreto sobre gestión de neumáticos usados, cuyo objeto es prevenir la generación de NFU y establecer el régimen jurídico de su producción y gestión, reducción, reutilización y reciclado, así como otras formas de valorización, con la finalidad de proteger el medio ambiente. El Real Decreto constituye la culminación de todo un proceso para optimizar la gestión de los NFU, estimulando las medidas de prevención (alargamiento de la vida útil, recauchados), promoviendo su reciclaje e incorporando el principio de responsabilidad del productor.

- LEY 20920 publicada el 2016, en la cual se establece el marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje (REP).

La ley tiene por objetivo incorporar la valorización de los residuos como un elemento primordial en la gestión de los residuos sólidos e introducir en la regulación existente en la materia, un instrumento económico que busca generar mecanismos que permitan aumentar los niveles de reciclaje de los residuos que actualmente se disponen en rellenos sanitarios o son depositados en vertederos ilegales.(Ministerio del Medio Ambiente, n.d.)

La REP, implica que los productores de *productos prioritarios* deben cumplir con ciertas obligaciones tales como registrarse, organizar y financiar la gestión de residuo, cumplir metas de recolección y valorización a través de alguno de los sistemas de gestión y asegurar que el tratamiento de los residuos recolectados se realice por gestores autorizados.(Ministerio del Medio Ambiente, n.d.)

Listado de productos abordados por la Ley REP Ver figura 8,



**Figura 7.** Listado de productos abordados por la Ley REP y que estarán sujetos a metas de recolección y valorización

Fuente: (Leyrep.cl, n.d.)

- Acuerdo de Producción Limpia (APL) para el manejo responsable de neumáticos fuera de uso (NFU) firmado en septiembre de 2018

El convenio reúne a las organismos públicos, asociaciones gremiales y representantes del sector privado, busca aplicar procesos de producción limpia en el ciclo completo de los neumáticos, a través de un trabajo colaborativo y el establecimiento de metas y acciones específicas. (*MINVU Firma Acuerdo de Producción Limpia Para El Reciclaje de Neumáticos*, 2018)

## Brasil

*LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010*

*Capítulo III. Das responsabilidades dos geradores e do poder público.*

*Seção II. Da Responsabilidade Compartilhada*

*Art. 33. São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de.*

*III. pneus.*

Esta Ley establece la Política Nacional de Residuos Sólidos, estableciendo sus principios, objetivos e instrumentos, así como lineamientos para la gestión integral y el manejo de residuos sólidos, incluidos los peligrosos, las responsabilidades de los generadores y autoridades e instrumentos públicos. condiciones económicas aplicables. En su artículo 33 numeral III enuncia que los fabricantes, importadores, distribuidores y comerciantes de llantas están obligados a estructurar e implementar sistemas de logística inversa, mediante la devolución de los productos después de su uso por parte del consumidor, independientemente del servicio público de limpieza urbana y gestión de residuos sólidos (LEI N° 12.305, 2010).

### **Argentina**

Resolución 523/2013. Establece las definiciones y lineamientos, para el desarrollo de una estrategia nacional referida al Manejo Sustentable de Neumáticos en su Ciclo de Vida, particularmente los Neumáticos de Desecho (Resolución 523, 2013).

### **Colombia**

Decreto ley 2811 de 1974, artículo 38, en el cual se expresa que por razones del volumen o de la calidad de los residuos, las basuras, desechos o desperdicios, se podrá imponer a quien los produce la obligación de recolectarlos, tratarlos o disponer de ellos, señalándole los medios para cada caso.

Resolución 1457 de 2010, mediante la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se adoptan otras disposiciones, en esta se estipulan las obligaciones de los productores, distribuidores, comercializadores de llantas y los importadores de vehículos.

Resolución 1326 de 2017, gracias a esta se deberá fomentar el aprovechamiento de llantas usadas en el territorio nacional, mediante la reutilización, el reciclaje y la valoración de sus

componentes energéticos, a su vez, expone que el aprovechamiento puede realizarse mediante actividades de coprocesamiento como la pirólisis.

La normatividad presentada refleja o evidencia el compromiso que tienen los países con la minimización de los impactos que son producidos por las llantas en desuso, en ellas se soporta la necesidad de generar estrategias para su recolección y tratamiento, entre las posibles alternativas de tratamiento está el proceso de pirólisis, el cual, permitiría a transformación de dichas llantas en subproductos que pueden ser aprovechados nuevamente.

### **3. RECUPERACIÓN DEL NEGRO DE CARBONO PROVENIENTE DE LLANTAS MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE PIRÓLISIS COMO ESTRATEGIA DE PROMOCIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN COLOMBIA**

Uno de los objetivos de la metodología de economía circular es la reducción parcial o total de los residuos que son depositados al ambiente por las actividades antrópicas, uno de estos residuos son las llantas, las cuales tienen unas características especiales, como ha sido descrito en apartados anteriores, que dificultan su transformación y/o aprovechamiento. Uno de los procesos que ha venido despertando el interés de los investigadores es el tratamiento por pirólisis, el cual, permite la generación de subproductos que pueden ser incluidos como materias primas en nuevos procesos y con un valor económico asociado, promoviendo un circuito con este producto.

#### **3.1. Pirólisis**

Se puede decir que una de las estrategias que busca la disminución de las cantidades de llantas presentes en los ecosistemas es la investigación, la cual promueve algunas soluciones totales o parciales a esta problemática a través de transformaciones de los componentes de una llanta.



En la actualidad, los métodos de eliminación de los desechos de caucho de neumáticos incluyen el vertido, el recauchutado, la gasificación, la incineración y la pirólisis (Duan et al, 2015; Li et al, 2016; Undri et al, 2013a). Como un modo típico de economía circular, la pirólisis es un método económico y respetuoso con el medio ambiente, ya que recupera los productos económicos de los neumáticos de desecho. (Zhong et al, 2019).

El proceso de pirólisis convierte el neumático en aceite de pirólisis, producto gaseoso y producto carbonizado, además de la recuperación de acero (Helleur et al., 2001, citado por Sagar et al, 2018). Para el caso del carbón sólido “negro de carbón recuperado o negro de humo” (CBr), se puede usar como relleno de negro de carbón o como combustible sólido y se puede actualizar para producir carbón activado. (Sagar et al, 2018).

Asimismo, Sagar et al, (2018) considera que la pirólisis de neumáticos es un proceso eficaz y sostenible, debido a su alta recuperación de energía y baja contaminación por emisiones de productos gaseosos desagradables, postulándose como una alternativa para resolver la problemática del caucho proveniente de llantas.

### **3.2. Obtención de negro de carbón recuperado o Negro de humo recuperado (CBr)**

A través de la pirólisis, Pilusa y Muzenda (2013), manifiestan que se puede obtener 366 kg de negro de humo por cada 1 tonelada de neumático (citado por Sagar, et al., 2018). El negro de humo reciclado (CBr) incluye negro de humo (80–90%) y sustancia inorgánica (10%–20%), que siempre están presentes en los compuestos de caucho utilizados en la fabricación de neumáticos (Sagar et al., 2018).

### **3.3. Usos del negro de carbón recuperado o Negro de humo recuperado (CBr).**

Actualmente, existen una serie de usos para el negro de carbono (CBr), la aplicación de CBr más directa es como sustituto de CB comercial, es decir, para usarse en formulaciones de caucho (Martínez et al., 2019), modificación de betún para mezcla de asfalto de carretera, aislante y hormigón. (Sagar et al., 2018)

Una de las principales dificultades a la hora de comercializar CBr está asociada a las cantidades de cenizas con la que este queda luego de ser pirolizado, Roy et al. (2005) expone que el CBr contiene virtualmente toda la materia inorgánica utilizada en la fabricación de neumáticos, ya que no se desvolatilizan a las temperaturas típicas de pirólisis. En consecuencia, la concentración de cenizas en CBr es considerablemente más alta ( $\approx 15\%$  en peso) en comparación con la de CB comerciales ( $< 0.5\%$  en peso) (Martínez et al., 2019).

Sagar et al. (2018) en su investigación *A potencial utilization of end-of-life tyres as recycled carbon black in EPDM rubber* hace la comparación del negro de carbono recuperado y el negro de carbono comercial N550 para el caucho de etileno propileno dieno (EPDM), donde identificó que la muestra que el CBr y el N550 contenían carbono y oxígeno como elementos principales, pero aparte de eso: sílice, azufre y zinc también están presentes en el CBr, con un porcentaje en peso de: 5.05, 2.25 y 3.56, respectivamente. Sin embargo, detectó una menor cantidad de azufre ( $\sim 1.25\%$  en peso) en N550. Además, el contenido de cenizas fue mayor en CBr que en N550 y el contenido de carbono unido fue menor en CBr en comparación con N550. Debido a la presencia de impurezas, CBr tenía menos área de superficie disponible para la adsorción física de moléculas de caucho en comparación con N550 y esto condujo a una disminución en la capacidad de refuerzo de CBr cuando se usa solo como relleno en compuestos de EPDM. Las impurezas presentes en la superficie del CBr inhibieron la reticulación de las cadenas de caucho. El tamaño de la estructura de CBr fue menor en comparación con el de N550.

Por otro lado, Martínez et al. (2019) centra su investigación en procesos de desmineralización al CBr a través de HCl y NaOH con el fin de disminuir las cantidades de cenizas presentes en el CBr, se tiene como resultado la reducción de cenizas de alrededor del 50% después de la

desmineralización, el contenido de cenizas en CBr se redujo en 67% ya que el contenido de cenizas disminuyó de 15.0% en peso a 4.9 % en peso.

De igual forma, Zhong et al. (2019) expone que para cumplir las normas comerciales de CB, es importante hacer modificaciones al CBr. La primera modificación está relacionada con la disminución de cenizas presentes en el CBr, concluye que tras el lavado con ácido clorhídrico (HCl), el contenido de cenizas del CBr se redujo del 22,5% al 8,4%. La otra modificación está relacionada con la superficie específica de los CBr, donde esta se aumenta luego de realizarse el método bombardeo de electrones de alta energía. Zhong et al. (2019) observaron que el tamaño del CBr se hizo más pequeño y uniforme después del tratamiento de bombardeo de electrones de alta energía dando como resultados una interacción entre el caucho natural (NR) y el CBr más fuerte. A diferencia de la modificación química, la tecnología de irradiación por haz de electrones es sencilla y de funcionamiento eficiente, no produce contaminación en las muestras y reduce al mínimo los residuos. (Zhong et al., 2019).

Gómez, (2019) también hace alusión al pretratamiento químico ácido-básico de los neumáticos de desecho como alternativa para la eliminación de aditivos inorgánicos como la sílice y los metales, entre otros (Gómez et al., 2019).

Otros autores como Medina y Guerrero, en su investigación Obtención de carbón de la pirólisis catalítica de hule de llanta y pruebas de adsorción mediante un método indirecto realizada en el 2014, presentan que a través de un catalizador (zeolita ácida ZSM-5 y alúmina) se puede mejorar la viabilidad económica de la pirólisis del caucho de llantas usadas, dado a que este catalizador disminuye los tiempos y la temperatura de pirolización, y adicionalmente aumenta la porosidad de CBr lo que lo hace más efectivo a la hora de su implementación como material absorbente de contaminantes.

Desde mi punto de vista considero que las investigaciones que se encuentran encaminadas a solucionar las características que impiden que negro de carbono logre su similitud con el negro de carbono comercial, tengan una mayor prioridad, dado que estas buscan la reincorporación de este negro carbón en la fabricación de nuevas llantas y así disminuir el consumo de materias primas para la fabricación de las mismas, por tal razón resalto la investigaciones anteriores dado a que demuestran que es posible o que estamos muy cerca de lograr que el negro de carbono recuperado sea considerada materia prima en la fabricación de llantas, asimismo estas investigaciones sirven de apoyo para aquellas empresas que se dedican a la fabricación de elementos en caucho, que por las políticas de su país o por su responsabilidad empresarial necesiten de alternativas para el manejo o transformación de la llantas.

Como se enuncia en el párrafos anteriores el negro de carbono recuperado también es implementado como material de retención de contaminantes, muy similar al efecto que realiza el carbón activado, algunos de los contaminantes que se han logrado retirar de las aguas son los colorantes, Amar Villaseñor, Barrera y Ardila en su investigación presentada en el IX Simposio de química aplicada (IX SIQUIA) y I Congreso internacional de nanoquímica, nanofísica y nanomedicina (I CINNN) en agosto de 2019, exponen que implementaron carbón derivados de un proceso de pirólisis en gránulos de cauchos con activación de CO<sub>2</sub> a 500 °C (Tipo I) y 700 °C (Tipo IV) y sin activación a 500 °C (Tipo III) y 700 °C (Tipo IV). La optimización se desarrolló con un diseño Box-Behnken, donde evaluaron tres parámetros de proceso (pH, temperatura, cantidad de adsorbente) usando una solución de tinción simulada con 100 ppm de colorante (Rojo Reactivo 250, Amarillo Reactivo 145 y/o Azul Reactivo 21) por 24 horas. Los porcentajes de remoción de colorante obtenidos varían en un rango de 29.31 a 99.55% para el rojo reactivo 250, de 33.66 a 98.01% para el amarillo reactivo 145 y de 43.36 a 100.00% para el azul reactivo 21, según el tipo de adsorbente de llanta empleado y las condiciones evaluadas (adsorbente sin activación y activado) y para todos los casos los mejores resultados se obtuvieron a 25°C y pH de 3.0 (Amar et al., 2019).

De acuerdo con el párrafo anterior, la implementación del negro de carbón recuperado como carbón activado, genero remociones favorables de contaminantes como colorantes, propongo que

el paso a seguir sería la identificación de los tipos de contaminantes que se pueden remover a través de este producto y así generar estrategias que permitan fortalecer el reconocimiento a nivel mundial de su uso y las posibilidades de mercado.

Por otra parte, la Universidad Pontificia Bolivariana en Medellín, analiza la valoración energética de los subproductos derivados del proceso de pirolisis en llantas desechadas a escala piloto (150 kWt) en un reactor Auger, con el fin de soportar la viabilidad técnica de este tipo de tratamientos y así reproducirlo a escala industrial, en las pruebas realizadas tuvieron las siguientes características temperatura  $550^{\circ}\text{C}$  y presión 1 bar y un tiempo de residencia del sólido en el reactor de 3 min. Los rendimientos de la fase líquida, sólida y gaseosa fueron  $42.6 \pm 0.1$ ;  $40.5 \pm 0.3$  y  $16.9 \pm 0.3$  wt.%, respectivamente” (Martínez et al., 2016).

Esto demuestra que la valoración energética es otro de los caminos para el aprovechamiento del CBr obtenido de la pirolisis en llantas.

La viabilidad para el desarrollo a gran escala de los casos expuestos en las investigaciones presentadas en este trabajo dependerá de múltiples factores, como costos operacionales, políticas de cada país, sistemas de recolección, tipos de reactores, mercado para los productos, por lo que a través de este trabajo no se puede garantizar que los procesos serán viables al momento de realizarlos a una escala mayor, sin embargo, en la investigación de Armas y Baño (2013) soportan por medio de análisis económicos y matemáticos la factibilidad en la fabricación y comercialización de productos en caucho reciclado proveniente de llantas usadas (Armas & Baño, 2013).

Además, considero que hace falta mayor intervención financiera o reconocimiento de los programas que puedan apoyar las investigaciones y los mercados el negro de carbono recuperado, dado que el fortalecimiento del mercado con relación al caucho recuperado incentivará la

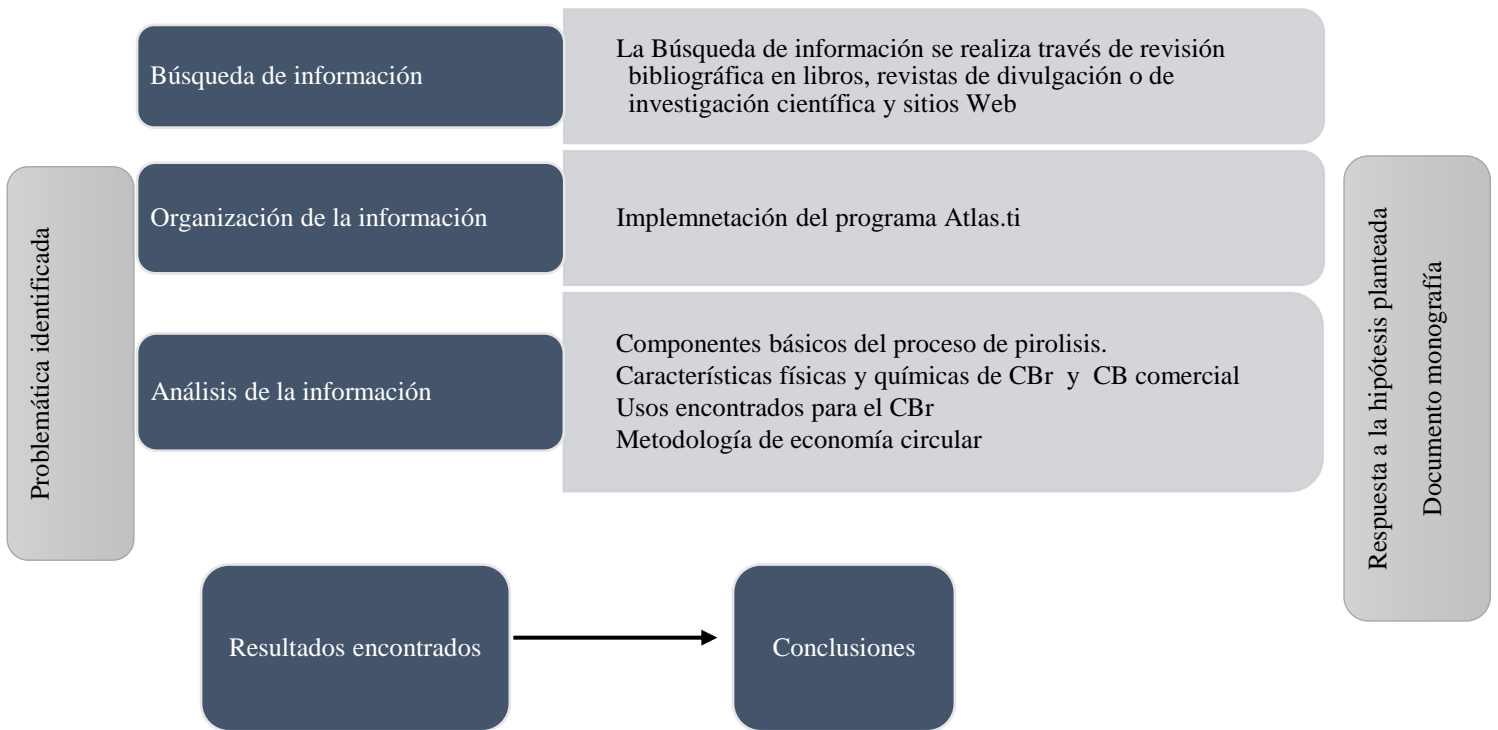
creación de nuevas empresas de transformación de este residuo, así mismo, permitirá la mitigar los impactos generado por las llantas desechadas y a su vez generara fuentes de empleo.

#### 4. METODOLOGÍA

El propósito de este estudio cualitativo - hermenéutico es revisar las alternativas del negro de carbono proveniente del proceso de pirólisis en llantas para su reincorporación en procesos productivos, como estrategia de promoción para una economía circular, identificando sus alternativas de reincorporación en el contexto nacional e internacional. Como instrumento de recolección de datos se utilizará el programa Atlas.Ti, el cual permite la identificación y separación de información que será objeto de análisis.

Se inicia con la búsqueda de información a través de revisión bibliográfica en libros, revistas de divulgación o de investigación científica y sitios Web, con relación a negro de carbono proveniente del tratamiento de pirólisis en llantas, posteriormente se realizará la organización de la información por medio de una esquematización donde primero se jerarquizará la documentación de mayor a menor relevancia (entre mayor similitud de información contenga el documento con objetivo de la monografía mayor será su relevancia) teniendo como insumo de apoyo el programa Atlas.Ti, la matriz de revisión bibliográfica y Mendeley, adicional, se organizará de acuerdo al país de publicación del documento: nacional (Colombia) - regional (Sur América) – global (resto del mundo) para facilitar la revisión de un contexto geográfico. Luego, se efectuará el análisis de la información recolectada en los ítems anteriores; se describirán los resultados encontrados con relación a las alternativas de reincorporación del negro de carbono (proveniente de la pirólisis en llantas) en procesos productivos y su relación con la economía circular, se procederá con la construcción de las conclusiones y, finalmente, se consolidará el documento de la monografía (ver esquema 1).

Esquema 1. Metodología





## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La economía circular es promovida a través de la reincorporación del negro de carbono recuperado, dado a que las investigaciones expuestas y las políticas que promueve este tipo de residuo evidencian el acoplamiento con los lineamientos que constituyen esta metodología, entre ellos está la reincorporación de productos reciclados y la minimización de residuos generados en los procesos de fabricación.

La principal limitante para sustituir el negro de carbono comercial por negro de carbono recuperado en los procesos de fabricación de nuevas llantas, está dado por el componente de cenizas que quedan en este compuesto luego de ser pirolizado, sin embargo, hay investigaciones que concluyen que tras el lavado con ácido clorhídrico (HCl), el contenido de cenizas del CBr se redujo del 22,5% al 8,4% (Zhong et al., 2019). Por lo que se podría considerar que este debe ser uno de los campos de investigación de mayor relevancia a la hora de promover soluciones a la problemática ambiental desencadenada por las llantas.

La reincorporación del negro de carbono recuperado (BCr) como materia prima en nuevos procesos productivos disminuye de forma indirecta la cantidad de residuos dispuestos en los ecosistemas, esto corresponde a una de las características que promueve la economía circular, para lograr un desarrollo óptimo de la metodología de economía circular será necesario no sólo investigar la problemática ambiental generada por las llantas al final del tubo, si no será necesario analizar todos las etapas del proceso productivo, materias primas, tecnologías implementadas, y relación consumidor vrs producto, con el fin de generar estrategias que permitan cerrar el ciclo frente a la fabricación de las llantas.

## 6. CONCLUSIONES

Frente a la identificación de avances técnicos y tecnologías relacionadas con la fabricación del negro de carbono recuperado, actualmente se cuenta con una gran diversidad de mecanismos y de equipos que permiten la transformación física y química del caucho en nuevos subproductos que cuentan con características de valor comercial.

Las características físicas entre el negro de carbono recuperado y el negro de carbono comercial son similares, ambos presentan un color negro y se encuentran en forma de gránulos finos, sin embargo, desde su composición química el negro de carbono recuperado cuenta, además de partículas de carbono, con una diversidad de impurezas denominada cenizas, mientras que el negro de carbono comercial está constituido solo por carbono elemental.

Además, si bien las características físicas de ambos compuestos son muy similares, la presencia de trazas de compuestos inorgánicos que quedan junto al negro de carbono recuperado en un proceso de pirólisis, hacen que estos dos compuestos difieran a la hora de ser implementados, se manifiesta que de acuerdo a las investigaciones referenciadas en este trabajo, aún no ha sido posible la generación de un negro de carbono recuperado libre de cenizas, recordemos que las cenizas son trazas de compuestos o aditivos adicionados en la fabricación de llantas nuevas y que quedan en el subproductos luego de realizar la transformación térmica (pirólisis).

A través del análisis de información técnica consultada se logró soportar que a través de investigaciones como la de Martínez et al. (2016) Valorización de neumáticos fuera de uso por pirólisis: rendimiento y propiedades de los productos usando un reactor de tipo auger y Martínez et al. (2019) *Carbon black recovery from waste tire pyrolysis by demineralization: Production and application in rubber compounding*, es posible producir y reincorporar negro de carbono como materia prima en otros procesos productivos como tintes, fabricación de nuevas llantas y carbón activado.

Finalmente, la correlación entre la economía circular y la reincorporación del negro de carbono esta soportada a través de la identificación de políticas nacionales e internacionales que promueven las estrategias de transformación de este tipo de residuos, lo que permite el desarrollo y fortalecimiento de la metodología economía circular a través de, principalmente la reincorporación de estos subproductos derivados de la pirólisis en nuevos procesos productivos, pero también con el fortalecimiento tecnológico, generación de alianzas y colaboraciones entre sus actores involucrados.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amar, S., Villaseñor, E., Barrera, R., & Ardila, A. (2019). APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTES EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES CON CARBÓN DE LLANTA COMO ADSORBENTE. In *IX Simposio de química aplicada (IX SIQUIA) y I Congreso internacional de nanoquímica, nanofísica y nanomedicina (I CINNN)*. adsorbente; aguas residuales; ambientales; buye a problemas sociales; carb. <http://aplicacionesbiblioteca.udea.edu.co:2259/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=5a5cd613-7069-4d2a-8652-4efddbc29ed1%40sdc-v-sessmgr03>
- Armas, J., & Baño, N. (2013). *Estudio de factibilidad para la fabricación y comercialización de productos en caucho reciclado de llantas usadas (adoquines de caucho, vinil de caucho, etc.) en la ciudad de Quito*. 183. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5825/1/UPS-QT04316.pdf>
- Arroyo, F. R., Bravo, D. N., & Rivera, M. A. (2018). Economía Circular: Un Camino Hacia Un Quito Más Sostenible. *INNOVA Research Journal*, 3(11), 139–158. <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n11.2018.767>
- Cáceres, E., Prada, & Gaudy. (2019). Evaluación de opciones de reciclaje para el fortalecimiento de la economía circular en Norte de Santander. *Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 17(2), 144–150.
- Carrión, J. L. (1999). Proceso de fabricación de las llantas de caucho. *Industrial Data*, 2(2), 40–43. <https://doi.org/10.15381/idata.v2i2.6525>
- Castro, G. (2008). *MATERIALES Y COMPUESTOS PARA LA INDUSTRIA DEL NEUMATICO*. [http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material\\_Complementario/Materiales\\_y\\_Compuestos\\_para\\_la\\_Industria\\_del\\_Neumatico.pdf](http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf)
- Dobrotă, D., Dobrotă, G., & Dobrescu, T. (2020). Improvement of waste tyre recycling

- technology based on a new tyre markings. *Journal of Cleaner Production*, 260.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121141>
- Etrma. (2011). End of life tyres. *End of Life Tyres - a Valuable Resource with Growing Potential*, 1–22. [http://www.wastexchange.co.uk/documenti/tyres/ETRMA\\_ELTS\\_report\\_2006.pdf](http://www.wastexchange.co.uk/documenti/tyres/ETRMA_ELTS_report_2006.pdf)
- Gómez, R., Panecatí, Y., & Méndez, M. (2019). High yield and simple one-step production of carbon black nanoparticles from waste tires. *Heliyon*, 5(7).  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02139>
- Gracia, P., Pérez, A., & Escalera, G. (2020). La Economía Circular Como Herramienta Para Mitigar Los Efectos Del Cambio Climático Sobre Los Recursos Hídricos: El Caso De España. *Dyna Ingeniería E Industria*, 95(1), 611–614.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6036/9310>
- Indiana General Assembly website. (n.d.). *Indiana General Assembly*.  
<http://iga.in.gov/legislative/laws/2020/ic/titles/013#13-20-14>
- Jain, A. (2016). Compendium of Technologies for the Recovery of Materials/Energy from End of Life (EoL) Tyres Final Report. *Nations, United Programme, Environment Environmental, International Centre, Technology*.  
<https://www.unenvironment.org/ietc/resources/report/compendium-technologies-recovery-materials-energy-end-life-eol-tyres>
- Lett, L. A. (2014). Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. *Revista Argentina de Microbiología*, 46(1), 1–2. [https://doi.org/10.1016/S0325-7541\(14\)70039-2](https://doi.org/10.1016/S0325-7541(14)70039-2)
- Leyrep.cl. (n.d.). *Ley REP*. <https://www.leyrep.cl/que-es#serv-top>
- Loctite Teroson. (n.d.). *Neumáticos de moto: partes, tipos y recomendaciones*.  
<https://blog.reparacion-vehiculos.es/neumaticos-moto-partes-tipos-recomendaciones>
- Lopez, F., Lopez, A., & Alguacil, F. (2008). SITUACIÓN ACTUAL DEL TRATAMIENTO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO Y POSIBILIDADES DE OBTENCIÓN DE NEGRO DE HUMO DE ALTA PUREZA. *European Tyre Recycling Association*, 1–25.  
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4202/1/ESTUDIO DE>

PREFACTIBILIDAD PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE NEGRO DE HUMO A PARTIR DEL RECICLAJE DE LLANTAS USADAS.pdf

- Martínez, J., Murillo, R., & García, T. (2013). Producción de negro de carbón a partir de la pirólisis de neumáticos usados. *Boletín Del Grupo Español Del Carbón*, 30, 10–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.06.023>
- Martínez, Juan D., Betancur, M., Murillo, R., García, T., & Veses, A. (2016). *Valorización de neumáticos fuera de uso por pirólisis : rendimiento y propiedades de los productos usando un reactor de tipo auger*. August 2015, 389–397.
- Martínez, Juan Daniel, Cardona-Uribe, N., Murillo, R., García, T., & López, J. M. (2019). Carbon black recovery from waste tire pyrolysis by demineralization: Production and application in rubber compounding. *Waste Management*, 85, 574–584. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.016>
- Ministerio del Medio Ambiente. (n.d.). *LEY 20920*. Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1087343>
- MINVU Firma acuerdo de producción limpia para el reciclaje de neumáticos. (2018). Construcción Sustentable. <https://csustentable.minvu.gob.cl/minvu-firma-acuerdo-de-produccion-limpia-para-el-reciclaje-de-neumaticos/>
- Park, J., Sarkis, J., & Wu, Z. (2010). Creating integrated business and environmental value within the context of China's circular economy and ecological modernization. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1494–1501. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.001>
- Parthasarathy, P., Choi, H., Park, H., Hwang, J., Yoo, H., Lee, B., & Upadhyay, M. (2016). Influence of process conditions on product yield of waste tyre pyrolysis- A review. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 33(8), 2268–2286. <https://doi.org/10.1007/s11814-016-0126-2>
- Peláez, G., Velásquez, S., & Giraldo, D. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Ciencia e Ingeniería Neogranadiana*, 27(3), 27–50. <https://doi.org/> <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2143> rEsumEN
- Rivera, R., Velasco, G., & Vacca, C. (2016). *Estudio De Prefactibilidad Para El Montaje De*

*Una Planta De Producción De Negro De Humo a Partir Del Reciclaje De Llantas Usadas*  
[Universidad Distrital Francisco José de Caldas].

[http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4202/1/ESTUDIO DE  
PREFACTIBILIDAD PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE  
NEGRO DE HUMO A PARTIR DEL RECICLAJE DE LLANTAS USADAS.pdf](http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4202/1/ESTUDIO_DE_PREFACTIBILIDAD_PARA_EL_MONTAJE_DE_UNA_PLANTA_DE_PRODUCCIÓN_DE_NEGRO_DE_HUMO_A_PARTIR_DEL_RECICLAJE_DE_LLANTAS_USADAS.pdf)

Saer, A. (2019). *Estrategia nacional de economía circular - ENEC*.

Sagar, M., Nibedita, K., Manohar, N., Kumar, K. R., Suchismita, S., Pradnyesh, A., Reddy, A. B., Sadiku, E. R., Gupta, U. N., Lachit, P., & Jayaramudu, J. (2018). A potential utilization of end-of-life tyres as recycled carbon black in EPDM rubber. *Waste Management*, 74, 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.003>

Serrano, K. (2017). *SINTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA CON BASE EN LLANTA RECICLADA Y ÓXIDOS DE HIERRO* (Vol. 12, Issue 1) [Universidad Nacional de Colombia].  
<http://bdigital.unal.edu.co/64910/1/1032358501.2018.pdf>

Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management*, 32(10), 1742–1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>

Tirel, K. (2017). Ingeniería de perfil de modernas plantas para reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU). *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, 68. [http://internal-pdf//Tirel \(2017\)  
Ingenieria plantas para reciclaje de NFU tesis UCH-0222119937/Tirel \(2017\) Ingenieria  
plantas para reciclaje de NFU tesis UCH.pdf](http://internal-pdf/Tirel%20(2017)%20Ingenieria%20plantas%20para%20reciclaje%20de%20NFU%20tesis%20UCH-0222119937/Tirel%20(2017)%20Ingenieria%20plantas%20para%20reciclaje%20de%20NFU%20tesis%20UCH.pdf)

UNIROYAL. (n.d.). *Componentes de los neumáticos*.

Williams, P. T. (2013). Pyrolysis of waste tyres: A review. *Waste Management*, 33(8), 1714–1728. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.003>

Xavier, C., & Velo, E. (2012). *Pirólisis Tratamiento y valorización energética de residuos* (Díaz de Sa).

Zamora, G., Blanco, W., & Hinojosa, O. (2019). Economía Circular En Minería : Procesamiento de desmontes como alternativa de remediación ambiental. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(2), 3–15. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522019000200001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522019000200001&script=sci_arttext)