



Evaluación del Impacto Ambiental de la Resolución 1326 de 2017 sobre la Gestión de Llantas Usadas en Bogotá / Colombia y su Contribución a los ODS 12 y 17.

Modalidad:
Monografía teórica.

Javier Mauricio Galvis Guerrero.
CC 1007775961

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de ciencias naturales e ingenierías
Ingeniería ambiental
Bucaramanga
20 de marzo de 2026



Evaluación del Impacto Ambiental de la Resolución 1326 de 2017 sobre la Gestión de Llantas Usadas en Bogotá / Colombia y su Contribución a los ODS 12 y 17.

Modalidad:
Monografía teórica.

Javier Mauricio Galvis Guerrero.
CC 1007775961

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

DIRECTOR

Néstor Mauricio Sarmiento Delgado

Grupo de investigación – Ingeniería Verde GRIIV

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de ciencias naturales e ingenierías
Ingeniería ambiental
Bucaramanga
20 de marzo de 2026

Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por las Unidades Tecnológicas de Santander para optar al título de Ingeniero Ambiental según acta de comité de trabajo de grado número 07 del 24 – 03 - 2026 Evaluador: Juan Sebastián Cruz Becerra



Juan Sebastián Cruz Becerra
Firma del Evaluador



Néstor M. Sarmiento D.
Firma del Director

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, quienes sentaron las bases de mi formación y me brindaron el apoyo incondicional que necesité para alcanzar esta meta académica. Agradezco a mi madre, mi tío y mi abuela, cuyos incansables esfuerzos y sacrificios me enseñaron el valor de la perseverancia y la importancia de aportar conocimiento al beneficio de nuestra sociedad. Este éxito también se debe a ustedes, como expresión de mi gratitud por su confianza y fe en mi capacidad para transformar los problemas ambientales en oportunidades de mejora para nuestra ciudad. Finalmente, dedico esta investigación a las futuras generaciones de profesionales comprometidos con la sostenibilidad, con la esperanza de que esta pequeña contribución sirva de base para construir un entorno más saludable y resiliente para todos.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible esta investigación. Agradezco a la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá por proporcionar datos estadísticos y técnicos esenciales para el análisis de la situación de los neumáticos fuera de uso en la capital. También agradezco al profesor Néstor Mauricio Sarmiento Delgado, mi director de tesis, por su asesoramiento experto, perspectiva crítica y guía magistral en el análisis de la Resolución 1326 de 2017. Asimismo, agradezco a los representantes de los Sistemas de Recolección Selectiva (SRS) que proporcionaron información sobre la logística de recuperación y los procesos de reciclaje. Finalmente, quisiera extender un agradecimiento especial a las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS), que me brindaron las herramientas académicas y el entorno de investigación necesarios para desarrollar soluciones sostenibles en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	10
INTRODUCCIÓN.....	12
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.2. JUSTIFICACIÓN	14
1.3. OBJETIVOS.....	16
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO REFERENCIAL.....	17
2.1. MARCO TEÓRICO	17
2.1.1. TEORÍA DE LA ECONOMÍA CIRCULAR.....	17
2.1.2. DESARROLLO SOSTENIBLE.....	18
2.1.3. GESTIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS	18
2.2. MARCO LEGAL	19
2.3. MARCO CONCEPTUAL.....	22
2.3.1. RESOLUCIÓN 1326 DE 2017:.....	22
2.3.2. GESTIÓN DE NEUMÁTICOS USADOS:.....	22
2.3.3. ECONOMÍA CIRCULAR:	22
2.3.4. BOGOTÁ:	22
2.3.5. IMPACTOS AMBIENTALES:.....	23
2.3.6. ODS 12:	23
2.3.7. ODS 17:	23
2.3.8. RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR (REP):	23
2.3.9. LOGÍSTICA INVERSA:	24
2.3.10. GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO (GCR):	24
2.3.11. PIRÓLISIS:	24
2.3.12. TRAZABILIDAD DIGITAL:.....	24
2.3.13. SALUD PÚBLICA:	25
2.3.14. SISTEMAS DE RECOLECCIÓN SELECTIVA (SRS):.....	25
2.3.15. DESARROLLO SOSTENIBLE:.....	25
2.3.16. LEY 2087 DE 2021:.....	25
2.3.17. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL:.....	26
2.3.18. GOBERNANZA DIGITAL:	26
2.3.19. RECICLAJE:	26

2.3.20.	OBJETIVOS DE RECOLECCIÓN:.....	26
2.4.	MARCO AMBIENTAL:	27
2.4.1.	IMPACTOS EN LOS RECURSOS DEL SUELO Y PROCESOS DE LIXIVIACIÓN.....	27
2.4.2.	IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL AIRE Y LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	27
2.4.3.	IMPACTOS EN LOS RECURSOS HÍDRICOS	28
2.4.4.	IMPACTOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD Y LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.....	29
2.5.	MARCO HISTÓRICO:	30
2.5.1.	CUMBRE DE LA TIERRA DE RÍO (1992).....	30
2.5.2.	RESOLUCIÓN 6/4 DE LA UNEA (2024).....	30
2.5.3.	RESOLUCIÓN 1457 DE 2010 (EL COMIENZO)	30
2.5.4.	RESOLUCIÓN 010 DE LA IDU DE 2015 (BOGOTÁ).....	31
2.5.5.	RESOLUCIÓN 1326 DE 2017 (ACTUALIZACIÓN)	31
2.5.6.	META PARA 2030:.....	32
2.6.	MARCO GEOGRÁFICO	32
2.6.1.	UBICACIÓN Y COORDENADAS	32
2.6.2.	LÍMITES Y ÁREA	33
2.6.3.	ESTRUCTURA POLÍTICO-ADMINISTRATIVA Y ACCESIBILIDAD	33
2.6.4.	RELEVANCIA AMBIENTAL DEL CONTEXTO ESPACIAL	35
2.6.5.	RELIEVE E HIDROGRAFÍA.....	35
3.	<u>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</u>	<u>37</u>
4.	<u>DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO</u>	<u>39</u>
5.	<u>RESULTADOS</u>	<u>50</u>
5.1.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA EFECTIVIDAD REGULATORIA Y LA CAPACIDAD OPERATIVA	50
5.2.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y RIESGOS BIOFÍSICOS ...	51
5.3.	EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES	52
5.4.	ANÁLISIS DE EFECTIVIDAD DE LOS MECANISMOS DE LA RESOLUCIÓN 1326 EN BOGOTÁ 55	
5.5.	CONTRIBUCIÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR Y CUMPLIMIENTO DE ODS.....	55
5.6.	IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES DE MEJORA Y BRECHAS CRÍTICAS	56
6.	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>57</u>
7.	<u>RECOMENDACIONES.....</u>	<u>58</u>
8.	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>61</u>
9.	<u>ANEXOS.....</u>	<u>63</u>

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Mapa político-administrativo de Bogotá D.C	34
Ilustración 2. Mapa hidrogeológico de Bogotá.....	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco legal relacionado a la resolución 1326 de 2017	20
Tabla 2. Metas de recolección selectiva según la resolución 1326 de 2017	41
Tabla 3. Balance de Gestión de NFU en Bogotá (Proyección 2024)	51
Tabla 4. Caracterización de Impactos y Frecuencia de Ocurrencia	52
Tabla 5. Evaluación de impactos bajo la metodología Conesa Antes y después de la resolución 1326 de 2017.	53

RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio examina los impactos ambientales y la efectividad operativa de la Resolución 1326 de 2017 sobre la gestión de llantas de desecho en Bogotá en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 y 17. A pesar de un marco legal sólido basado en la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y legislación técnica como la Ley 2087 de 2021, se identificó una brecha de implementación significativa: el 22,5% de los residuos termina en canales de disposición informal.

Un análisis sistémico y multidimensional demuestra que la disposición inadecuada en áreas marginales causa cargas ambientales sustanciales, incluyendo la liberación de contaminantes orgánicos persistentes a través de quemas ilegales y riesgos epidemiológicos por vectores de enfermedades.

Los hallazgos muestran que el éxito de la economía circular en el distrito capital se ve obstaculizado por la subutilización de la capacidad instalada y la falta de trazabilidad digital. Se proponen como soluciones un modelo de gobernanza digital y la recuperación mediante pirólisis controlada, que podrían alcanzar una tasa de recolección del 90 % para 2030.

En conclusión, se observa que la transición hacia una ciudad sostenible requiere alianzas público-privadas que transformen los residuos en un recurso estratégico para la infraestructura vial y la industria química, alineando así las políticas locales con los objetivos globales de sostenibilidad.

Palabras clave: gestión de neumáticos al final de su vida útil, Resolución 1326 de 2017, ODS 12, ODS 17, Bogotá.

ABSTRACT

This study evaluates the environmental impact and operational effectiveness of Resolution 1326 of 2017 on waste tire management in Bogotá within the context of Sustainable Development Goals (SDGs) 12 and 17. Despite a robust legal framework based on Extended Producer Responsibility (EPR) and technical legislation such as Law 2087 of 2021, a significant implementation gap was identified: 22.5% of waste ends up in informal disposal channels.

A systemic and multidimensional analysis demonstrates that inadequate disposal in marginal areas causes significant environmental burdens, including the release of persistent organic pollutants through illegal burning and epidemiological risks from disease vectors.

The findings show that the success of the circular economy in the capital district is limited by the underutilization of installed capacity and the lack of digital traceability. One proposed solution is a digital control and materials recovery model using controlled pyrolysis, which aims to achieve a 90% collection rate by 2030.

It is concluded that the transition to a sustainable city requires public-private partnerships that transform waste into a strategic resource for road infrastructure and the chemical industry, thus aligning local policies with global sustainability goals.

Keywords: end-of-life tire management, Resolution 1326 of 2017, SDG 12, SDG 17, Bogotá.

INTRODUCCIÓN

La disposición de llantas usadas en grandes ciudades como Bogotá ha pasado de ser una simple gestión de residuos a un desafío para la seguridad ambiental y la salud pública. Si bien Colombia cuenta con un marco legal sólido, la presencia continua de llantas usadas en humedales, canales y espacios públicos en barrios como Bosa y Kennedy sugiere una brecha entre la normativa y su implementación práctica.

Para contextualizar este problema, el estudio se basa en la jerarquía de derechos a un medio ambiente sano establecida en la Constitución de 1991 (artículos 79 y 80), precisada en la Ley 99 de 1993. Esta ley asigna la autoridad de supervisión a la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y a la secretaría de medio ambiente de cada distrito. Si bien la literatura actual documenta el crecimiento del parque vehicular y las metas de recolección, este trabajo realiza una contribución original al afirmar que el principal obstáculo para resolver el problema no es la falta de legislación, sino la falta de trazabilidad de los residuos y la creación de mercados para subproductos como el granulado de caucho reciclado (RGG), regulado por la Ley 2087 de 2021.

El método utilizado para abordar esta problemática es analítico-proactivo con un enfoque sistémico. La triangulación de datos permitió comparar los informes oficiales sobre recolección selectiva de residuos con la identificación de puntos críticos de impactos biofísicos y epidemiológicos en la ciudad. Este proceso metodológico permitió evaluar no solo el logro cuantitativo de la meta, sino también la calidad cualitativa de las alianzas estratégicas requeridas para el ODS 17, estas

alianzas son fundamentales para abordar las deficiencias en el consumo y la producción responsables identificadas en el ODS 12.

Este trabajo detalla cada paso de la investigación, desde el diagnóstico de las debilidades de la Resolución 1326 hasta el desarrollo de una solución tecnológica basada en pirólisis controlada y gobernanza digital. El objetivo no es solo responder a la pregunta de investigación, sino también proporcionar una herramienta técnica que permita a Bogotá transitar de un modelo de gestión reactivo a uno proactivo. Como resultado, las llantas usadas ya no se considerarán residuos peligrosos, sino que se convertirán en un componente importante de la economía circular del distrito capital.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento Del Problema

A nivel mundial, la acumulación de neumáticos usados representa una de las principales fuentes de residuos sólidos no biodegradables, con una producción anual de más de mil millones de unidades. La gestión inadecuada de estos residuos es particularmente crítica en los países en desarrollo, donde la falta de infraestructura y la informalidad en la recolección y disposición de neumáticos resultan en graves daños al medio ambiente y la salud pública (Vásquez Velásquez & Muñoz Ospina, 2025).

A nivel continental, en Latinoamérica, el problema se ve agravado por la limitada implementación de políticas de responsabilidad extendida del productor (REP) y la ausencia de un marco legal sólido para la gestión integral de residuos.

La falta de coordinación entre los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil dificulta el desarrollo de una economía circular eficaz. En este contexto, la Resolución 1326 de 2017 en Colombia, si bien representa un avance, presenta deficiencias en su implementación y supervisión (Quio Rubina, 2025).

El problema radica en la ineficiencia de los mecanismos de gestión, la deficiente coordinación entre las partes interesadas y la ausencia de un sistema de reciclaje sólido que permita la recuperación de estos residuos. Esta situación crea un círculo vicioso de contaminación, riesgos para la salud pública y pérdidas económicas, sin valorizar un material con un alto potencial de reutilización (Chaname Yafac, 2024).

¿Cuál es el impacto ambiental y la efectividad de los mecanismos establecidos en la Resolución 1326 de 2017 para la gestión de la devolución de llantas usadas, y cómo se relaciona el cumplimiento de esta normatividad con el nivel de contaminación ambiental en la ciudad de Bogotá?

1.2. Justificación

La gestión inadecuada de llantas usadas en Colombia, especialmente en la ciudad de Bogotá, representa un problema crítico que afecta tanto al medio ambiente como a la salud pública. La Resolución 1326 de 2017, si bien representa un avance en la regulación de la gestión de llantas usadas, presenta deficiencias en su implementación y cumplimiento, lo que resulta en una gestión ineficiente de los residuos. La acumulación de llantas usadas en vertederos clandestinos y lugares inadecuados genera problemas ambientales, como la contaminación del suelo y el agua, y riesgos para la salud pública debido a la proliferación de vectores de enfermedades (Lizarazo Gómez, 2024).

Es necesario abordar el problema de la gestión inadecuada de neumáticos usados para mitigar los impactos ambientales y sanitarios asociados a su acumulación y disposición inadecuada. La implementación efectiva de la Resolución 1326 de 2017 y el fortalecimiento de los mecanismos de gestión pueden contribuir a reducir la contaminación ambiental y promover la sostenibilidad en el sector de la gestión de residuos (Lizarazo Gómez, 2024).

Al abordar el problema de la gestión inadecuada de neumáticos usados, se pueden generar varios efectos positivos, como la reducción de la contaminación ambiental mediante una gestión adecuada de los neumáticos, esto puede reducir la contaminación del suelo, el agua y el aire, además de reducir la acumulación de neumáticos usados en lugares inadecuados puede reducir los riesgos para la salud pública asociados con la proliferación de vectores de enfermedades y al implementar prácticas sostenibles de gestión de neumáticos usados puede promover la economía circular y reducir el consumo de recursos naturales (Lopez Sobrado, 2023).

Esta propuesta es relevante para las UTS porque se alinea con las líneas de investigación relacionadas con la sostenibilidad y el medio ambiente contempladas en el grupo de Investigación en Ingeniería Verde GRIIV COL0187029. Además, la gestión adecuada de llantas usadas puede tener aplicaciones prácticas en la vida diaria de los estudiantes y contribuir al campo de conocimiento y la sociedad en general. La propuesta también puede aportar valor teórico y práctico en el ámbito de la gestión de residuos y la sostenibilidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el impacto ambiental y la efectividad de los mecanismos establecidos en la Resolución 1326 de 2017 para la gestión de la devolución de llantas usadas en la ciudad de Bogotá, con el fin de identificar oportunidades de mejora y proponer soluciones sostenibles que contribuyan a la reducción de la contaminación ambiental y la promoción de la economía circular.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Realizar un análisis detallado de la Resolución 1326 de 2017 y su implementación en la ciudad de Bogotá, identificando fortalezas y debilidades en la gestión de llantas usadas.
2. Evaluar el impacto ambiental del manejo inadecuado de las llantas usadas en la ciudad de Bogotá, considerando factores como la contaminación del suelo, agua y aire, y los riesgos a la salud pública.
3. Identificar oportunidades de mejora en la gestión de llantas usadas en la ciudad de Bogotá, considerando la implementación de prácticas de reciclaje y reúso, y la promoción de la economía circular.
4. Proponer soluciones sostenibles para la gestión de llantas usadas en la ciudad de Bogotá, considerando la colaboración entre los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil, y la implementación de tecnologías y prácticas innovadoras.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. Marco teórico

2.1.1. Teoría de la economía circular

La economía circular es una alternativa regenerativa al modelo lineal de "extraer, producir, desechar", se basa en el principio de que los recursos deben circular en circuitos cerrados para maximizar su valor. En lugar de considerar los neumáticos como residuos finales, esta teoría los define como una fuente secundaria de materia prima. Con este enfoque, el ciclo de vida del neumático no termina en el asfalto, sino que se transforma mediante procesos de reciclaje que prolongan su uso o mediante la reutilización de materiales. En este proceso, el caucho, el acero y las fibras textiles se separan e integran en nuevas cadenas de producción (Ocampo Gutiérrez, 2025).

Para Colombia, este enfoque es crucial para cumplir con su responsabilidad ambiental de larga data. Su importancia radica en combatir la acumulación de neumáticos en espacios públicos y vertederos, neumáticos que han tardado siglos en descomponerse y representan riesgos de incendio incontrolables. Mediante la implementación de la Estrategia Nacional de Economía Circular, el país está transformando un riesgo para la salud en una oportunidad industrial al utilizar gránulos de caucho reciclado para mejorar la elasticidad del asfalto en carreteras nacionales o como combustible alternativo en hornos de cemento (Vásquez Velásquez & Muñoz Ospina, 2025).

Este modelo es crucial porque proporciona a los participantes del mercado herramientas legales y operativas. La responsabilidad extendida del productor, promovida por organizaciones como Rueda Verde, garantiza un flujo de materiales transparente y eficiente. Por lo tanto, la economía circular en Colombia no es solo

una teoría ambiental, sino también un motor de innovación tecnológica. Combina el cumplimiento de la Resolución 1326 de 2017 con la creación de nuevos mercados verdes y protege los ecosistemas locales de la contaminación química causada por la disposición de estos materiales (Ibarra Vega & Osorno Osorio, 2025).

2.1.2. Desarrollo Sostenible

El desarrollo sostenible se consolida como una filosofía de armonía que trasciende el crecimiento puramente numérico y propone un progreso que respeta los límites biológicos del planeta. Esta teoría entiende la economía no como una entidad aislada, sino como un sistema integrado en una sociedad justa y un medio ambiente sano. En este sentido, la sostenibilidad es el arte de gestionar la escasez y la abundancia con miras al futuro, garantizando que la búsqueda de la prosperidad presente no agote el capital natural que las generaciones futuras necesitan para prosperar (García, 2025).

Este marco teórico promueve innovaciones con un enfoque humano, donde la gestión de residuos no solo beneficia al medio ambiente, sino que también fortalece la economía local. El desarrollo sostenible en el sector de neumáticos promueve el uso industrial, con el apoyo de la Ley de Protección del Clima, para generar empleos dignos y cualificados en las plantas de procesamiento. De esta manera, el reciclaje de neumáticos en Colombia, bajo esta premisa, garantiza que el progreso en la modernización de la infraestructura vial sea compatible con la protección de la vida humana y que la responsabilidad corporativa se convierta en un pilar del bien común (Vásquez Velásquez & Muñoz Ospina, 2025).

2.1.3. Gestión De Residuos Solidos

En el escenario colombiano, la gestión de residuos es la herramienta táctica que permite establecer los objetivos de sostenibilidad en soluciones concretas para neumáticos usados. Su importancia es de suma importancia, ya que estos artículos se clasifican como residuos especiales, lo que evita que sean recogidos por el baño de rutina. Una gestión robusta regulada por el Decreto 1077 de 2015 garantiza que los neumáticos no terminen los canales de drenaje o la incitación de incendios en el vertido, sin continuar una estricta cadena de almacenamiento desde el montaje hasta la planta de procesamiento (Jaramillo Gallo, 2023).

Para el país, este concepto es el motor de la formalización de la industria del reciclaje y la transformación de un problema logístico en una estructura eficiente de logística inversa. Mediante la implementación de planes de gestión específicos, según lo exige la Agencia Nacional del Ambiente (ANLA), Colombia garantiza que todo tipo de residuos voluminosos se recolecten, procesen y reciclen de acuerdo con las normas técnicas. Por ejemplo, la gestión de residuos no solo reduce los riesgos ambientales, sino que también profesionaliza el sector, garantizando que los residuos se conviertan en un activo estratégico para la competitividad nacional y la protección del medio ambiente urbano (Vesga Ferreira, 2025).

2.2. Marco Legal

El marco legal para la gestión de llantas en Colombia se estructura como un marco regulatorio y se basa en la Resolución 1326 de 2017. Esta norma no se creó de forma aislada, sino que sirve como implementación operativa de las disposiciones generales de la Constitución de 1991 y la Ley 99 de 1993, que establecen la protección del medio ambiente como una obligación constitucional. Si bien el Decreto 1076 de 2015 establece el marco técnico para las evaluaciones de impacto ambiental, la Resolución 1326 redefine la relación entre productores y

residuos al institucionalizar la responsabilidad extendida del productor y transformar la obligación de disponer de llantas en una estrategia obligatoria de logística inversa.

Este marco legal se complementa con legislación pionera como la Ley 2087 de 2021, que garantiza el cierre del ciclo económico al promover el uso de caucho reciclado en la infraestructura nacional. El cumplimiento de la resolución se convierte así en un mecanismo concreto para que el país alcance las metas del CONPES 3918, vinculando cada neumático desechado al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 12 y 17 de la ONU. En general, estas regulaciones garantizan que la gestión de residuos en Bogotá no sea una medida aislada, sino una política gubernamental amparada por las disposiciones sancionadoras de la Ley 1333 de 2009, garantizando así la transición definitiva de un modelo lineal a uno circular y sostenible.

Tabla 1. Marco legal relacionado a la resolución 1326 de 2017

Ley / Decreto	Descripción	Relevancia
Acuerdo de París (COP21)	Acuerdo mundial para limitar el calentamiento global y reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).	La gestión bajo la Resolución 1326 contribuye a la meta nacional de descarbonización. Procesos como la trituración mecánica y la pirólisis controlada reducen las emisiones de CO2 en un 90% en comparación con la producción de caucho nuevo, además de prevenir quemas ilegales que liberan contaminantes altamente tóxicos al aire de Bogotá
CONPES 3918	Define la hoja de ruta para implementar los ODS en Colombia y establece metas nacionales de reciclaje y valorización de residuos.	Alinea las metas de recolección de llantas de la Resolución 1326 con los indicadores de sostenibilidad del país. Esto impulsa mercados para subproductos como el Granulado de Caucho Reciclado (GCR), regulado posteriormente por la Ley 2087 de 2021.
Constitución política de	Establece el derecho a un ambiente sano y la obligación del estado de prevenir y controlar el deterioro ambiental.	Fundamento ético que justifica la intervención estatal en la gestión de

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

1991(Art. 79 y 80)		residuos para proteger la salud pública.
Ley 99 de 1993	Crea el ministerio de ambiente y el SINA, definiendo los principios de precaución y prevención ambiental.	Base administrativa que permite a la ANLA regular y vigilar los impactos de las llantas usadas.
Ley 1333 de 2009	Establece el procedimiento sancionatorio ambiental ante el incumplimiento de normas de manejo de residuos.	Garantiza la coercitividad del marco legal, castigando prácticas lineales como el abandono o quema de llantas.
OCDE	La OCDE promueve políticas que mejoren el bienestar económico y social; para el ingreso, los países deben demostrar estándares de alta calidad en su gestión ambiental.	El compromiso ante la OCDE exige la implementación del principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP). La Resolución 1326 materializa este compromiso al obligar legalmente a fabricantes e importadores a gestionar el ciclo de vida completo de la llanta, evitando que sea una carga exclusiva para el Estado.
Agenda 2030	Es un plan de acción global a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, que establece 17 objetivos con metas específicas para el año 2030.	La Resolución 1326 es la herramienta operativa en Bogotá para cumplir con el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) al fomentar el reciclaje y la reutilización de llantas, y con el ODS 17 (Alianzas para lograr los Objetivos) mediante la creación de Sistemas de Recolección Selectiva (SRS) entre el Estado y el sector privado.
Decreto 1076 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente; compila las reglas sobre licencias y gestión de residuos.	Marco procedimental para la Evaluación de Impacto Ambiental, asegurando que el tratamiento de llantas sea técnico.
Resolución 1326 de 2017	Establece los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas.	Norma maestra que obliga a la economía circular y asigna responsabilidades a productores y consumidores.
CONPES 3918 de 2018	Define la estrategia nacional para la implementación de los ODS en Colombia.	Alinea la normativa de llantas con los indicadores internacionales de consumo responsable (ODS 12) y alianzas (ODS 17).
Ley 2087 de 2021	Dicta lineamientos para el uso de Grano de Caucho Reciclado (GCR) en mezclas asfálticas y obras públicas.	Vincula la gestión de residuos con el desarrollo de infraestructura, cumpliendo con las metas de valorización del ODS 12.

Nota: Tabla elaborada por el autor, 2026.

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Resolución 1326 de 2017:

Reglamento colombiano sobre la recolección selectiva de neumáticos usados, que obliga a los fabricantes a cumplir con objetivos de gestión ambiental. Esta legislación establece el marco legal para que las empresas asuman la responsabilidad del reciclaje de sus productos y eviten que terminen en vertederos o espacios públicos.

2.3.2. Gestión de Neumáticos Usados:

Conjunto de procesos logísticos y técnicos para la recolección, el tratamiento y la recuperación responsables y seguros de neumáticos usados. Esto incluye la recepción en los puntos de recolección y el procesamiento final para prevenir la contaminación ambiental derivada de grandes cantidades de caucho.

2.3.3. Economía Circular:

Modelo que busca preservar el valor de materiales como el caucho y el acero en ciclos cerrados y transformar los residuos en nuevas materias primas con valor comercial. Este enfoque reduce la dependencia de materias primas primarias y minimiza la huella de carbono al reintegrar los subproductos de los neumáticos a la industria.

2.3.4. Bogotá:

El contexto urbano del estudio, donde la alta densidad vehicular presenta desafíos significativos para la disposición de neumáticos y el control de las fuentes

de contaminación en áreas vulnerables, sirve como escenario para evaluar si las estrategias nacionales pueden traducirse eficazmente en soluciones locales para la restauración del espacio público.

2.3.5. Impactos Ambientales:

Evaluación de los impactos negativos del manejo inadecuado y la lixiviación de metales pesados de neumáticos al final de su vida útil sobre el suelo, el agua y el aire. El análisis permite cuantificar el daño a la biodiversidad y desarrollar medidas de mitigación para preservar los servicios ecosistémicos urbanos.

2.3.6. ODS 12:

Objetivo mundial para promover la producción y el consumo sostenibles mediante la reducción, el reciclaje y la reutilización de residuos industriales y domésticos. La aplicación de este objetivo en esta monografía subraya la importancia de modificar los patrones de consumo y aumentar la responsabilidad corporativa a lo largo de todo el ciclo de vida del producto.

2.3.7. ODS 17:

Estrategia de alianzas público-privadas para fortalecer la implementación de soluciones tecnológicas y logísticas para la gestión de residuos especiales. Este objetivo enfatiza la necesidad de cooperación internacional y local para movilizar recursos y conocimientos que permitan abordar el problema de los neumáticos.

2.3.8. Responsabilidad Extendida del Productor (REP):

Principio jurídico que obliga a fabricantes e importadores a financiar y organizar la recolección de sus productos al final de su vida útil. Esto traslada la

responsabilidad de la gestión de residuos del Estado a las empresas, lo que fomenta el desarrollo de productos más duraderos y fáciles de reciclar.

2.3.9. Logística Inversa:

Sistema operativo para la devolución de neumáticos usados desde los consumidores a los puntos de recolección, asegurando su correcta reintegración a la cadena de producción nacional. Es el motor de un flujo eficiente de residuos desde el punto de consumo hasta las plantas de procesamiento, cerrando así el ciclo del material.

2.3.10. Granulado de Caucho Reciclado (GCR):

Material obtenido del triturado de neumáticos, utilizado para mejorar la elasticidad y durabilidad de las mezclas asfálticas en las carreteras colombianas. Su uso no solo reduce el ruido vial, sino que también proporciona una solución técnica sostenible para la infraestructura de transporte del país.

2.3.11. Pirólisis:

Tecnología de descomposición térmica que permite la recuperación segura de energía y materiales químicos de los neumáticos sin generar emisiones tóxicas. Este proceso convierte el caucho residual en combustibles o negro de humo, ofreciendo una alternativa altamente eficiente al tratamiento de residuos.

2.3.12. Trazabilidad Digital:

Sistema de monitoreo tecnológico para rastrear el origen y destino de los neumáticos en tiempo real y prevenir la disposición informal y el comercio ilegal. El

uso de datos y plataformas digitales garantiza la transparencia en el logro de los objetivos de recolección por parte de todos los involucrados.

2.3.13. Salud Pública:

Prevención de riesgos epidemiológicos y respiratorios derivados de la acumulación de neumáticos usados, que sirven como criaderos de mosquitos y fuentes de incendios tóxicos. La gestión eficiente de neumáticos reduce la incidencia de enfermedades transmitidas por vectores y mejora la calidad de vida de los residentes cercanos a puntos críticos.

2.3.14. Sistemas de Recolección Selectiva (SRS):

Organizaciones establecidas por los fabricantes para gestionar la recolección de neumáticos usados y garantizar el cumplimiento de las metas ambientales fijadas por el Ministerio del Ambiente. Actúan como interfaz operativa entre los grandes productores de residuos y las empresas que procesan materias primas.

2.3.15. Desarrollo Sostenible:

Un modelo de progreso que equilibra el crecimiento económico con la protección de los recursos naturales para garantizar el bienestar de las generaciones futuras. Este estudio propone que la gestión de neumáticos debe ser rentable, socialmente equitativa y ambientalmente responsable.

2.3.16. Ley 2087 de 2021:

Ley que promueve el uso obligatorio de caucho reciclado en la infraestructura nacional, impulsando así el mercado y la demanda de materiales reciclados. Esta

ley complementa la Resolución 1326 al crear un mercado real para los productos de reciclaje de neumáticos en Colombia.

2.3.17. Contaminación Ambiental:

Daños a ecosistemas como humedales y suelos causados por la liberación de sustancias químicas tóxicas durante la lenta descomposición de neumáticos usados al aire libre. Estos residuos llegan a los cursos de agua, afectando la fauna autóctona y la calidad del agua subterránea.

2.3.18. Gobernanza Digital:

Utilización de herramientas de datos para coordinar a los actores del sector, mejorar la transparencia administrativa y formalizar la contratación de trabajadores del reciclaje. El objetivo es crear un sistema de monitoreo eficiente que permita al gobierno realizar un seguimiento de la protección ambiental mediante indicadores precisos y actualizados.

2.3.19. Reciclaje:

Conversión mecánica de los componentes de los neumáticos (acero, fibras y caucho) en nuevos materiales, reduciendo significativamente las emisiones de CO₂. El procesamiento de estos materiales evita la extracción de nuevas materias primas y reduce la carga sobre los vertederos municipales.

2.3.20. Objetivos de recolección:

Metas porcentuales para medir la efectividad de las políticas ambientales, con el ambicioso objetivo de reciclar el 100 % de los neumáticos usados para 2030.

Estos indicadores permiten evaluar el desempeño de los fabricantes y adaptar las estrategias nacionales para lograr un país libre de neumáticos.

2.4. Marco Ambiental:

Este análisis técnico evalúa la relación entre los objetivos de la investigación y la protección de los recursos naturales, basándose en los principios de prevención y responsabilidad ambiental. Examina hasta qué punto la Resolución 1326 de 2017 representa un obstáculo técnico para mitigar las externalidades negativas de los neumáticos usados.

2.4.1. Impactos en los Recursos Del Suelo y Procesos de Lixiviación

En Bogotá, el suelo es el principal receptor de los neumáticos usados desechados ilegalmente algunos de los impactos más representativos son los metales pesados (principalmente zinc, debido a su uso en el proceso de vulcanización, así como cadmio y plomo) migran al horizonte orgánico del suelo, esto altera el complejo de intercambio catiónico y elimina los organismos del suelo responsables de la fijación de nitrógeno.

Según la Resolución 1326 de 2017, se establecen criterios de almacenamiento que exigen superficies impermeables para reducir el riesgo de lixiviación de sustancias químicas hacia capas más profundas del suelo.

2.4.2. . Impactos en la Calidad Del Aire y las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

La quema incontrolada de neumáticos usados es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica en las zonas periurbanas. Debido a su alto poder calorífico, los neumáticos usados se queman de forma incompleta, liberando hollín, un contaminante de corta duración con un alto potencial de calentamiento global.

Impactos presentados: Además de las partículas en suspensión (PM2.5), cuya concentración supera los límites de la OMS, se emiten contaminantes orgánicos persistentes (COP) como dioxinas y furanos. La Resolución 1326 prioriza los procesos de recuperación de energía y productos químicos (por ejemplo, pirólisis controlada) que capturan estas emisiones mediante sistemas de limpieza de gases de escape y filtros de mangas.

Este análisis se ajusta a los compromisos de Colombia en virtud del Acuerdo de París (2015) y a la política nacional de calidad del aire, y promueve la reducción de emisiones mediante el uso industrial de subproductos del caucho.

2.4.3. Impactos en los Recursos Hídricos

En Bogotá, el vertido de neumáticos usados en el sistema de alcantarillado y los cursos de agua (Río Bogotá, humedales) altera las propiedades fisicoquímicas y reológicas del agua.

Impactos presentados: La acumulación de neumáticos crea obstrucciones mecánicas que reducen la velocidad del flujo y provocan la disminución del oxígeno (anoxia) debido a la retención de materia orgánica en descomposición. Además, el agua estancada en los neumáticos proporciona condiciones óptimas para la reproducción de vectores de enfermedades (como el mosquito *Aedes aegypti*,

transmisor de la fiebre amarilla), lo que convierte un problema ambiental en una crisis de salud pública.

La gestión selectiva establecida por la normativa garantiza la retirada de los neumáticos usados de la ribera del río, de conformidad con la Ley N° 99 de 1993 sobre la Protección de Cuencas Hidrográficas y Zonas de Recarga de Aguas Subterráneas.

2.4.4. Impactos Sobre la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos

El tiempo de permanencia de los neumáticos usados en ecosistemas de importancia estratégica perjudica el hábitat de especies endémicas y reduce la resiliencia de los ecosistemas.

Impactos presentados: Los contaminantes químicos en el agua y el suelo provocan procesos de bioacumulación en la cadena alimentaria y afectan la capacidad reproductiva de la fauna local.

La transición a una economía circular propuesta en esta monografía, respaldada por la Ley 2087 de 2021 (Uso de granulado de caucho en asfalto), permite cerrar el ciclo de los materiales. Al generar demanda industrial de granulado de caucho, se reduce la presión sobre los ecosistemas naturales y se promueve la recuperación de áreas contaminadas por neumáticos usados.

2.5. Marco Histórico:

La cronología de los neumáticos en Colombia es una historia del aprendizaje institucional frente a las catástrofes ambientales:

2.5.1. Cumbre de la Tierra de Río (1992)

Contribución clave: Aquí se estableció el principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP).

Importancia: Anteriormente, el municipio (el estado) era responsable de la eliminación de residuos. Tras Río, se estableció que los fabricantes e importadores de productos que generan residuos difíciles de eliminar (como neumáticos) deben pagar y organizar su eliminación. Este es el núcleo de la legislación colombiana actual.

2.5.2. Resolución 6/4 de la UNEA (2024)

Enfoque moderno: Esta resolución de la Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente se centró en los microplásticos.

Relevancia para los neumáticos: Se reconoció que la abrasión de los neumáticos en las carreteras es una de las mayores fuentes de microplásticos en los océanos. Esto impulsó a Colombia no solo a investigar la eliminación de neumáticos usados, sino también a mejorar la calidad de los polímeros utilizados para reducir el impacto ambiental durante su uso.

2.5.3. Resolución 1457 de 2010 (El Comienzo)

Esta fue la primera regulación con aplicación efectiva. Exigía a los importadores establecer programas como "Rueda Verde".

Objetivo: Inicialmente, se estableció la devolución obligatoria del 5% de los neumáticos vendidos.

Limitación: La regulación solo abarcaba neumáticos para automóviles y camionetas. Los neumáticos para motocicletas y maquinaria pesada (por ejemplo, en minería) estaban exentos, lo que generó un vacío legal durante siete años.

2.5.4. Resolución 010 de la IDU de 2015 (Bogotá)

Esta resolución es una obra maestra técnica. Bogotá reconoció que la recolección de neumáticos era inútil si el caucho no se reutilizaba.

Innovación: La resolución estableció que el asfalto de las carreteras de Bogotá debía contener granulado de caucho reciclado (GCR).

Resultado: Las carreteras pavimentadas con granulado de caucho son más resistentes, menos propensas a agrietarse por el sol y la lluvia, y reducen el ruido del tráfico. De esta manera, los residuos se transformaron en una ganancia de infraestructura.

2.5.5. Resolución 1326 de 2017 (Actualización)

Esta es la normativa vigente en todo el país.

Ampliación del alcance: Ahora también incluye neumáticos de bicicletas, motocicletas y maquinaria de construcción.

Jerarquía de gestión: Establece que el recauchutado técnico (reutilización de la carcasa) debe tener prioridad sobre la incineración o el triturado.

2.5.6. Meta para 2030:

Los fabricantes deben recolectar y reciclar al menos el 65 % de los neumáticos comercializados.

Estrategia Nacional de Economía Circular (2018)

Se modificó la redacción. El enfoque ya no se centra en la "prevención de residuos", sino en la "preservación del valor".

Impacto: Permitió a las empresas cementeras (como Argos y Holcim) reconocer los neumáticos como combustible legítimo, reduciendo así el uso de carbón primario y solucionando el problema de la acumulación de neumáticos en vertederos.

2.6. Marco Geográfico

Este estudio se centra en las áreas urbanas y rurales del Distrito Metropolitano de Bogotá, Colombia, principal centro de disposición de neumáticos usados del país y área prioritaria para la implementación de la Resolución 1326 de 2017.

2.6.1. Ubicación y Coordenadas

Bogotá, D.C., se ubica en el centro geográfico de Colombia, en la Cordillera Oriental de los Andes, en la región natural conocida como la Sabana de Bogotá. Sus coordenadas geográficas son:

Latitud: 4° 35' 56" N

Longitud: 74° 04' 51" O

Altitud: Promedio de 2630 metros sobre el nivel del mar.

2.6.2. Límites y Área

El Distrito Metropolitano abarca un área total de aproximadamente 1636 km², de los cuales unos 384 km² corresponden a la ciudad propiamente dicha. El resto está compuesto por áreas rurales y reservas naturales (como el sistema del Páramo de Sumapaz).

Limita con:

Norte: Municipio de Chía.

Sur: Departamento de Meta y Huila.

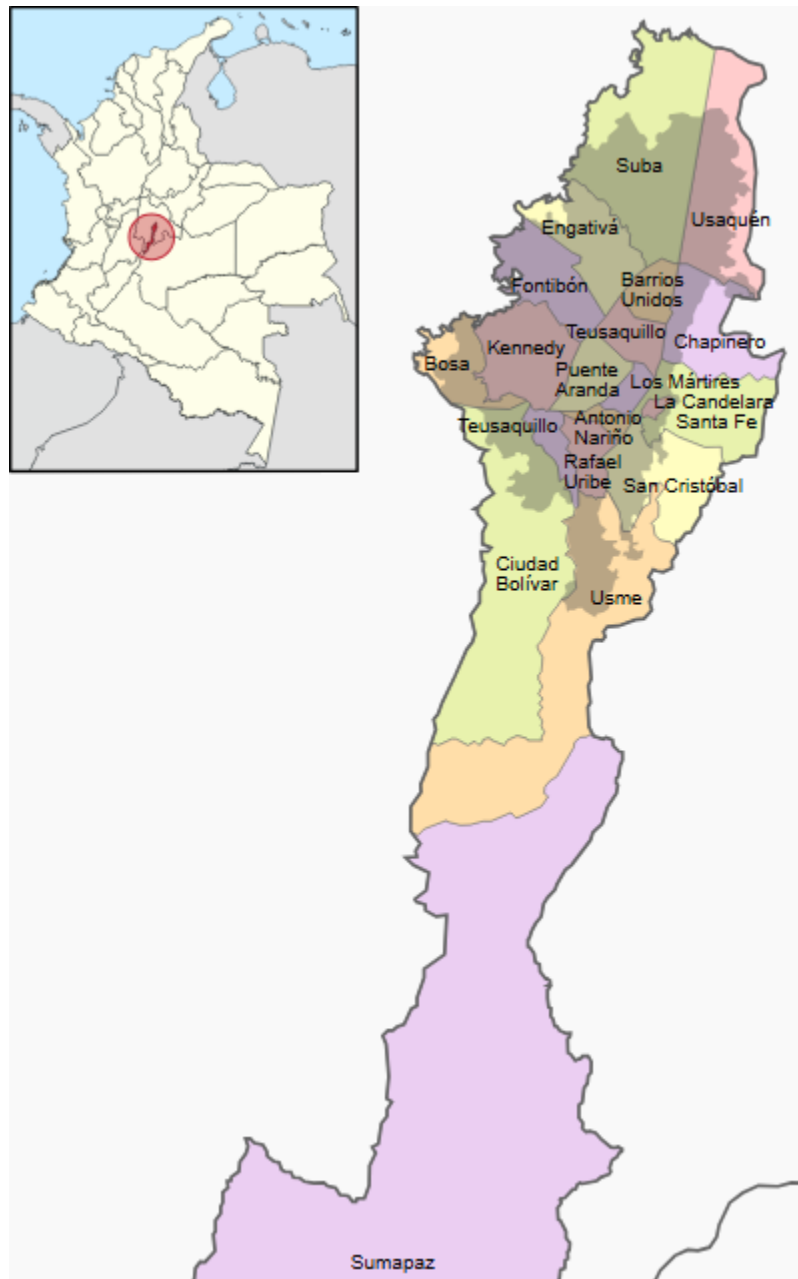
Este: Municipios de La Calera, Choachí, Ubaque, Chipaque, Gutiérrez y Arbeláez.

Oeste: Río Bogotá y los municipios de Cota, Funza, Mosquera y Soacha.

2.6.3. Estructura Político-Administrativa y Accesibilidad

El área se divide en 20 localidades. Para los fines de este estudio, el análisis se centra en las localidades con mayor densidad de servicios automotrices y principales centros de acopio de neumáticos usados, incluyendo Kennedy, Fontibón, Engativá, Puente Aranda y Los Mártires. La ciudad cuenta con buena accesibilidad a través de rutas de transporte estratégicas (Autopista Sur, Calle 13 y Avenida Boyacá), que facilitan el transporte de neumáticos usados a las plantas de procesamiento en la zona industrial y las comunidades aledañas.

Ilustración 1. Mapa político-administrativo de Bogotá D.C



Fuente: Mapas Bogotá, 2025.

2.6.4. Relevancia Ambiental del Contexto Espacial

La estructura espacial de Bogotá, con un parque vehicular de más de 2.5 millones de unidades, ejerce una presión constante sobre su sistema especializado de gestión de residuos. Las condiciones de humedad y temperatura de la sabana, combinadas con la presencia de aguas de flujo lento (humedales), convierten a los neumáticos desechados en reservorios ideales para la proliferación de vectores de enfermedades y fuentes de incendios, lo que justifica la urgencia de la aplicación técnica de la Resolución 1326 de 2017 en esta zona en particular.

2.6.5. Relieve e Hidrografía

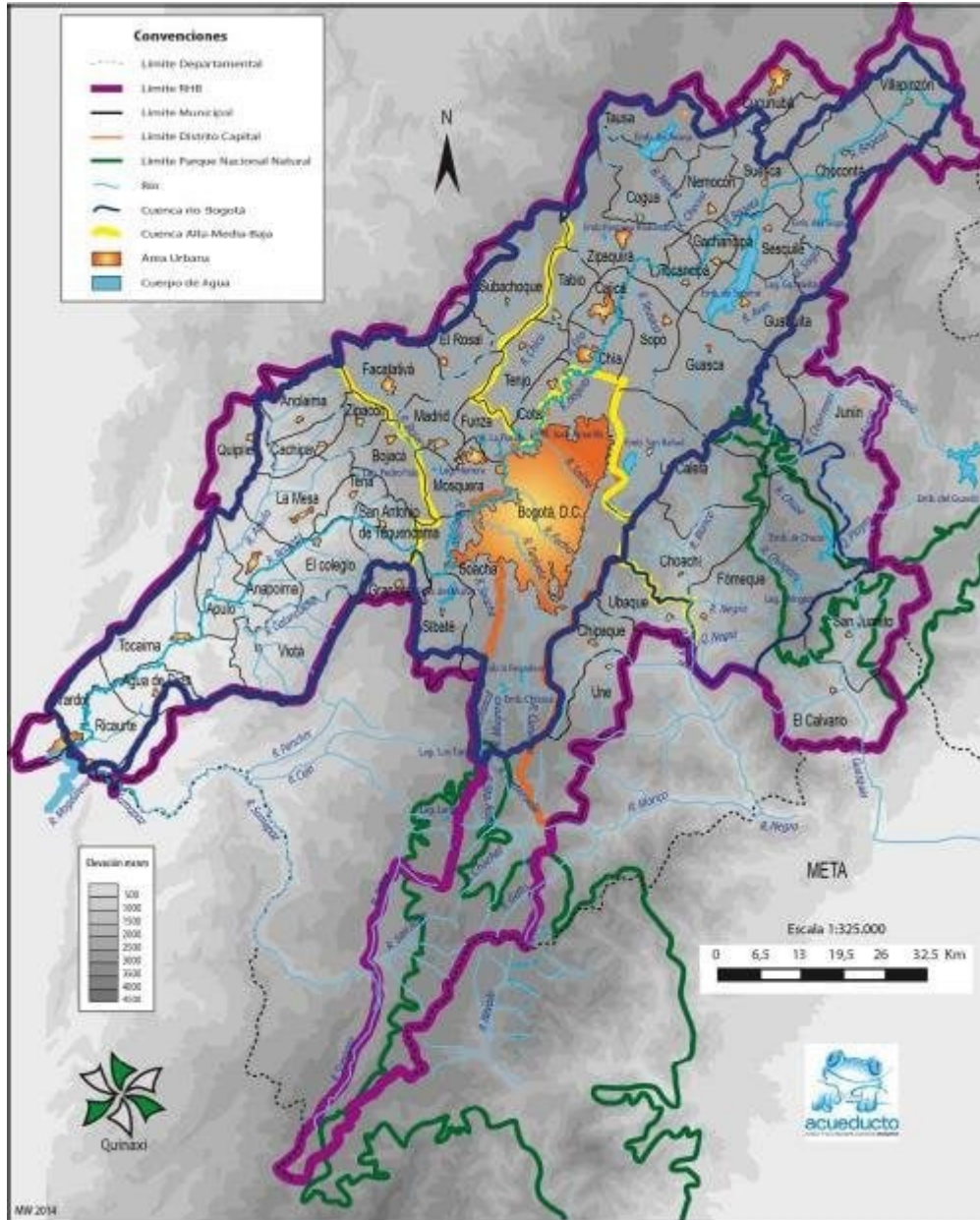
Relieve:

La ciudad se ubica en una llanura lacustre, bordeada al este por las colinas orientales. Esta topografía plana favorece la acumulación de residuos en zonas bajas si no se cuenta con un sistema eficiente de gestión de residuos.

Hidrografía:

La ciudad pertenece a la cuenca central del río Bogotá. Sus principales cuencas hidrográficas son los ríos Salitre (Juan Amarillo), Fucha y Tunjuelo. Estos cursos de agua, junto con humedales (como Tibabuyes y La Vaca), son los ecosistemas más amenazados por el vertido ilegal de neumáticos. Esto provoca obstrucciones mecánicas y contaminación química por lixiviados.

Ilustración 2. Mapa hidrogeológico de Bogotá.



Fuente: Mapas Bogotá, 2025.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La estructura metodológica de esta monografía se concibe como un análisis documental descriptivo-explicativo, su carácter descriptivo surge de la necesidad de presentar de forma exhaustiva la estructura operativa de la Resolución 1326 de 2017, que regula la recolección selectiva de residuos en Colombia. Sin embargo, el estudio va más allá de la mera descripción y adopta un enfoque explicativo para determinar cómo las deficiencias en la implementación de esta normativa en la capital colombiana han exacerbado la acumulación de llantas usadas y, en consecuencia, el deterioro de los servicios ecosistémicos. Este proyecto permite vincular la teoría de la economía circular con la práctica administrativa y evaluar si los instrumentos legales de 2017 son suficientes para abordar los desafíos de una ciudad como Bogotá.

El enfoque cualitativo elegido permite un análisis hermenéutico de la normativa., el investigador interpreta el texto legal para identificar las deficiencias que dificultan el transporte eficiente de llantas usadas a las plantas de procesamiento. Si bien se incluyen datos cuantitativos de los comités de seguimiento de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), como las cantidades recolectadas en comparación con las metas establecidas, el análisis se centra en la calidad de la gestión y la coherencia de las alianzas entre las partes interesadas. Para ello, se aplica el método deductivo. Partiendo de los compromisos globales de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 12 y 17 de la ONU, estos se aplican a la realidad de Bogotá mediante la comparación del texto legal con los informes de seguimiento de la secretaría de medio ambiente del departamento.

El proceso se divide en cuatro fases de análisis exhaustivo, la primera fase se centra en la revisión técnica de la Resolución 1326 de 2017 y evalúa su responsabilidad extendida del productor (REP) para determinar si los incentivos y las sanciones son adecuados para el contexto urbano.

En la segunda fase, se realizará una reconstrucción técnica de los impactos ambientales. Con base en literatura especializada, se determinará cómo la disposición ineficiente de neumáticos altera el ciclo del nitrógeno en el suelo y genera emisiones críticas en la atmósfera de Bogotá.

La tercera fase sirve como puente hacia la innovación al identificar brechas tecnológicas y logísticas mediante la comparación con los estándares internacionales de economía circular.

En la cuarta fase, se consolida finalmente la solución propuesta, en esta fase, el diseño metodológico culmina con la síntesis de un modelo de gestión que integra la colaboración de diversos actores y tecnologías de vanguardia. Esta fase final es crucial, ya que traduce los hallazgos de la investigación en una hoja de ruta técnica que aborda directamente el objetivo general de reducir la contaminación ambiental en el marco de los conceptos de sostenibilidad global.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

Este estudio está diseñado como un análisis integral que va más allá de una simple descripción de actividades y representa una evaluación sistemática del ciclo de vida de los neumáticos en la ciudad de Bogotá. Las fases llevadas a cabo se describen en detalle e incluyen un análisis técnico-científico de la efectividad de la Resolución 1326 de 2017 y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La primera fase de este estudio consistió en un análisis detallado de la Resolución 1326 de 2017, que no solo representa un requisito administrativo, sino que también sienta las bases de la responsabilidad extendida del productor (REP) en el país. El análisis documental reveló que esta normativa surgió como una respuesta necesaria a las limitaciones de su resolución anterior (Resolución 1457 de 2010) y amplió significativamente su alcance para incluir tipos de neumáticos que históricamente habían existido en una zona gris legal, como los neumáticos para motocicletas, bicicletas y vehículos pesados (Res. 1326, 2017).

El análisis del sistema de gestión ambiental de Bogotá debe basarse en su fundamento constitucional, según la Constitución de 1991 (artículos 79 y 80), se consagra el derecho fundamental a un medio ambiente sano y la responsabilidad del Estado de prevenir la degradación ambiental. Este mandato ético se consagra además en la Ley 99 de 1993, que estableció el Sistema Nacional de Gestión Ambiental (SINA) y codificó los principios de precaución y prevención. Esto faculta a las autoridades para intervenir en actividades que podrían causar daños irreversibles, como la disposición de llantas usadas.

En este contexto, la Resolución 1326 de 2017 funciona como una norma general que pone en práctica estos principios y exige la implementación de sistemas

de economía circular. Sin embargo, su eficacia depende no solo de la voluntad de implementarlos, sino también de su aplicabilidad. Aquí es donde entra en juego la Ley 1333 de 2009, que establece el procedimiento de sanciones ambientales. Esta ley garantiza que el incumplimiento de las metas de recaudación o prácticas como el vertido o la quema de llantas en zonas como Bosa o Kennedy no queden impunes, y que se atiendan los daños resultantes al patrimonio natural de los bogotanos.

En cuanto a las fortalezas técnicas, la regulación establece un marco de objetivos de venta progresivos, que teóricamente obliga a fabricantes e importadores a fortalecer su logística de recogida. Sin embargo, una comparación del texto legal con su implementación práctica en Bogotá reveló una grave deficiencia: la regulación carece de mecanismos de control para el sector informal de reparación de neumáticos, que es el primer punto de contacto para los ciudadanos de la capital en lo que respecta a la disposición de residuos. Esta debilidad estructural conduce a una fragmentación de la cadena de disposición de equipos, lo que resulta en que una parte significativa de los neumáticos usados se viertan ilegalmente en cuencas fluviales y espacios públicos en barrios como Bosa, Kennedy y Ciudad Bolívar, donde la supervisión estatal es menos estricta (Peña Porras, 2024).

La efectividad de la medida se mide mediante el cumplimiento de las metas anuales, calculadas con base en el promedio de llantas comercializadas en años anteriores. Para Bogotá, esto implica que los sistemas de recolección selectiva de residuos (SRS) deben acelerar el aumento de su capacidad operativa. A continuación, se presenta el desglose técnico de las metas de recolección selectiva y gestión ambiental que conforman el marco de este estudio (Res. 1326, 2017).

Tabla 2. Metas de recolección selectiva según la resolución 1326 de 2017

Año	Meta de Recolección mínima (%)	Periodo base para el cálculo de la meta
2018	45%	2015-2016
2019	50%	2016-2017
2020	55%	2017-2018
2021	60%	2018-2019
2022	65%	2019-2020
2023	70%	2020-2021
2024	75%	2021-2022
2025	80%	2022-2023

Nota: (Res. 1326, 2017).

El progreso hacia el logro de estos objetivos indica que el sistema debería ser capaz de gestionar casi todos los residuos para 2030. Sin embargo, las investigaciones sugieren una discrepancia entre las metas establecidas y la realidad en Bogotá. Si bien los informes nacionales indican cierto cumplimiento, la acumulación de llantas en los humedales de la ciudad demuestra que la meta actual del 75 % (2024) presenta deficiencias significativas en el sistema.

La resolución, auspiciada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, estipula que el incumplimiento de estas metas conllevará importantes sanciones económicas, según la Ley 1333 de 2009. Sin embargo, para que Bogotá alcance su meta del 90 % para 2030, es fundamental que la secretaría de medio ambiente del departamento clasifique a los talleres informales de reparación de llantas no solo como negocios regulados, sino también como centros logísticos

oficiales, transformando su rol de contaminadores a promotores de la economía circular.

Este aumento porcentual obligará a la industria a pasar de la mera recolección a la valorización energética, ya que la capacidad de los vertederos y las instalaciones de trituración existentes es insuficiente para gestionar el volumen de residuos proyectado para finales de la década.

evaluación empírica y documental. Esta fase examinó los impactos físicos, químicos y socio ecológicos de la disposición inadecuada de llantas en la ciudad de Bogotá. El análisis trascendió la descripción superficial de los daños y se basó en una evaluación de factores ambientales críticos. Esto permitió medir el alcance de la responsabilidad ambiental que las llantas representan para el capital, especialmente en zonas donde la segregación socioespacial aumenta el riesgo.

En cuanto a la calidad del aire, el estudio examinó las propiedades termodinámicas y químicas de las emisiones generadas por la quema ilegal de llantas, una práctica generalizada en zonas periféricas. Se encontró que el caucho, al ser un polímero de alta densidad energética, se quema de forma incompleta en condiciones de combustión abierta. Esto libera grandes cantidades de material particulado (PM2.5) a la atmósfera, que puede penetrar profundamente en los alvéolos pulmonares (Peña Porras, 2024).

Sin embargo, el hallazgo más crítico fue la detección de contaminantes orgánicos persistentes (COP), en particular dioxinas y furanos, así como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Estos compuestos se caracterizan por su alta estabilidad química y su capacidad de bioacumularse y biomagnificarse en la cadena alimentaria. Su presencia en el aire de Bogotá representa un riesgo

latente de cáncer y trastornos endocrinos en la población circundante, transformando un residuo en una crisis para la calidad del aire y la salud respiratoria (Peña Porras, 2024).

En cuanto a la degradación de los recursos suelo y agua, el estudio evaluó los fenómenos de lixiviación mecánica y química que se producen. Las llantas abandonadas en espacios públicos de Bogotá están expuestas a una combinación de alta radiación ultravioleta y la acidez característica de las lluvias de la capital. Esta exposición actúa como catalizador que acelera la despolimerización del caucho, liberando metales pesados altamente tóxicos como zinc, cadmio, plomo y cromo, así como aditivos químicos utilizados en el proceso de vulcanización. Estos contaminantes penetran la estructura del suelo, modificando su pH y eliminando la microfauna esencial para su salud (Trujillo Angulo, 2024).

Durante las lluvias intensas, estos elementos son transportados por la escorrentía superficial a los sistemas de alcantarillado y, posiblemente, a los sedimentos de los humedales circundantes, donde se depositan y afectan la biodiversidad acuática (Trujillo Angulo, 2024).

Finalmente, desde una perspectiva de salud pública, la investigación identificó un riesgo epidemiológico estructural asociado a la morfología de los neumáticos. Debido a su diseño toroidal y sus propiedades aislantes, los neumáticos se convierten en un criadero predilecto del mosquito *Aedes aegypti*, vector de transmisión de enfermedades como el dengue, el zika y el chikunguña. La geometría del neumático permite el estancamiento de agua limpia, mientras que el neumático negro absorbe el calor, manteniendo una temperatura interna constante que protege a las larvas de las fluctuaciones de temperatura durante la noche. Este fenómeno transforma los vertederos clandestinos y los cementerios de neumáticos

en focos epidemiológicos, concluyendo que el impacto social es asimétrico (Tapia, y otros, 2025).

La evaluación de los impactos ambientales identificados en esta investigación se encuentra en el Decreto 1076 de 2015 (el único decreto reglamentario del sector ambiental). Este decreto establece normas sobre licencias y gestión de residuos, garantizando que todo proceso de tratamiento de neumáticos cumpla con rigurosas normas técnicas para prevenir la contaminación cruzada.

La quema y el vertimiento incontrolado de residuos en humedales, analizados en este estudio, representan una violación directa a este marco procesal, pues desconocen las medidas de mitigación y control exigidas por el decreto para proteger la tierra, el agua y la salud pública de fugas y emisiones tóxicas.

La tercera fase de la investigación se centró en la identificación y validación de alternativas de recuperación, partiendo de la premisa de que los neumáticos fuera de uso (NFU) no deben gestionarse como residuos terminales, sino como fuente de materias primas secundarias. Este enfoque está estrechamente vinculado al ODS 12 (Consumo y Producción Responsables), cuyo objetivo es reducir significativamente la generación de residuos mediante la prevención, la reducción, el reciclaje y la reutilización para 2030.

En el contexto específico de Bogotá, el estudio centró su análisis en la cadena de valor de los gránulos de caucho reciclado (GCR). Se evaluó la madurez tecnológica de las plantas de procesamiento de la región, revelando que la trituración mecánica es la técnica predominante. Este proceso permite la separación de los tres componentes fundamentales del caucho: caucho (elastómero), acero (alambre de alta resistencia) y fibras textiles. El estudio determinó que, si bien la

tecnología para obtener un GCR de alta pureza está disponible, existe una subutilización de la capacidad instalada debido a que la demanda del mercado local no ha crecido al mismo ritmo que las metas de recolección establecidas por la Resolución 1326 de 2017.

Uno de los hallazgos más importantes de esta fase fue el análisis del caucho reciclado (RBR) en la infraestructura vial. Si bien el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) fue pionero en la aplicación de asfalto modificado con caucho, la investigación identificó una serie de obstáculos técnicos y económicos que impedían su uso generalizado. Estos incluyen los costos logísticos asociados con el transporte de los gránulos a las plantas de asfalto y la necesidad de equipos especializados para la mezcla en caliente. Sin embargo, las oportunidades identificadas son exponenciales: la inclusión de caucho reciclado no solo cierra el ciclo del material, sino que también mejora las propiedades mecánicas de las vías de Bogotá, aumentando su resistencia a la fatiga, reduciendo el agrietamiento térmico y la contaminación acústica por fricción vehicular, lo que representa un beneficio ambiental indirecto a gran escala.

Además, el estudio mapeó a las partes interesadas y los mercados emergentes, explorando aplicaciones sociales menos complejas, pero de alto impacto, como la producción de pisos de seguridad para áreas de juegos, umbrales de estacionamiento, mobiliario urbano y aislamiento acústico para edificios sostenibles.

Se concluyó que, para fortalecer la economía circular de la capital, es fundamental adoptar un modelo de contratación pública verde, donde el distrito capitalino exija un porcentaje mínimo de contenido reciclado en sus proyectos de ingeniería civil. Esta intervención estatal actuaría como catalizador para dinamizar

el mercado, garantizando que las iniciativas de recolección selectiva se traduzcan efectivamente en la reintegración de materiales a la economía, minimizando la presión sobre los recursos naturales y evitando la incineración o el enterramiento de materiales.

La transición de Bogotá hacia un modelo circular se basa fundamentalmente en la Ley 2087 de 2021. Esta ley representa un paso importante en la gestión de neumáticos fuera de uso (NFU), estableciendo directrices obligatorias para el uso de caucho reciclado granulado (GCR) en mezclas asfálticas y proyectos de obras públicas. De esta manera, los residuos se vinculan directamente con el desarrollo de la infraestructura urbana, permitiendo a la ciudad alcanzar sus objetivos de valorización de materiales.

Esta integración de residuos e infraestructura no es casual; es coherente con la hoja de ruta desarrollada por el CONPES 3918 de 2018, que define la estrategia nacional para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Este documento alinea las iniciativas locales de recolección de neumáticos con los indicadores internacionales del ODS 12 (consumo responsable), transformando la obligación legal en un objetivo global de desarrollo sostenible.

Finalmente, esta fase destaca que una economía circular en Bogotá requiere una simbiosis industrial, donde los residuos de un sector (transporte) se convierten en insumos para otro (construcción y manufactura). Solo mediante la creación de estos ecosistemas colaborativos podremos garantizar que el crecimiento urbano de la ciudad no esté vinculado linealmente al aumento de la contaminación por polímeros, sino que sea coherente con la visión de una metrópolis resiliente y eficiente en el uso de los recursos para finales de la década.

La fase culminante de la investigación se centró en el diseño de una cartera de soluciones multidimensionales, basada en el ODS 17 (Alianzas para lograr los Objetivos). Argumentamos que la gestión de neumáticos al final de su vida útil (NFU) en una metrópolis de más de ocho millones de habitantes no puede resolverse únicamente con decretos prohibitivos; más bien, requiere una arquitectura de soluciones que combine innovación tecnológica avanzada con modelos de colaboración multisectorial que integren al gobierno, el sector privado y la sociedad civil.

A. Innovación Tecnológica: Hacia la Pirólisis de Alta Eficiencia

Dada la saturación de los métodos tradicionales de reciclaje, esta investigación propone la adopción de la pirólisis controlada como un estándar superior para la recuperación de materiales. A diferencia del co-tratamiento térmico en hornos de cemento, donde el material se consume para producir energía con baja eficiencia, la pirólisis es un proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno que permite la recuperación molecular de los componentes de los neumáticos. Esta técnica es la máxima expresión de la economía circular, ya que genera tres subproductos comerciales de alto valor:

Aceite Piroclítico (ATP): Un combustible líquido con alta densidad energética que puede refinarse o utilizarse en calderas industriales, reduciendo así la dependencia de hidrocarburos vírgenes.

Negro de Humo Recuperado (CBR): Un material sólido que, tras los procesos de limpieza, puede reintegrarse en la producción de nuevos neumáticos o productos de caucho, cerrando así el ciclo técnico del material.

Acero de alta pureza: Recuperado magnéticamente y listo para su reintegración a la industria siderúrgica, libre de los contaminantes orgánicos que suelen quedar tras la agitación ilegal.

La construcción de plantas de pirólisis en la sabana de Bogotá permitiría tratar los enormes volúmenes de neumáticos fuera de uso (NFU) que el reciclaje mecánico (RCM) no puede absorber, transformando una responsabilidad ambiental crucial en una fuente de ingresos para los sistemas de recolección selectiva.

B. Gobernanza Digital y Trazabilidad mediante Blockchain

Para abordar la fragmentación de la cadena de suministro y la informalidad de los talleres de reparación de neumáticos, esta investigación propone la creación de una plataforma de gobernanza digital. Inspirada en los modelos de Logística 4.0, esta solución aprovecha la tecnología Blockchain para crear un CV digital para cada neumático que ingresa al mercado de Bogotá.

Este sistema permitiría:

Trazabilidad en tiempo real: Desde la importación o producción, pasando por las ventas minoristas, hasta la entrega final certificada.

Incentivos para el consumidor: Implementación de un "token ambiental" o crédito fiscal para los ciudadanos que entreguen sus neumáticos en los puntos de recolección oficiales, desincentivando así el abandono de residuos en espacios públicos.

Formalización de los actores clave: Integración de pequeños talleres mediante una aplicación móvil que facilita la recolección programada por parte de gestores autorizados, eliminando así la necesidad de intermediarios informales que utilicen el sistema para almacenar neumáticos.

C. Alianzas Estratégicas y Compra Pública Verde (ODS 17)

Finalmente, la sostenibilidad del sistema depende de la creación de un mercado sólido. La propuesta institucional sugiere que la Alcaldía Mayor de Bogotá, a través de la Secretaría de Movilidad y el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano), elabore especificaciones con criterios de sostenibilidad obligatorios. Esto significa que cualquier obra de infraestructura vial o adquisición de flota para el sistema Transmilenio debe certificar el uso de materiales extraídos de llantas recicladas.

Este enfoque de “alianza público-privada” garantiza que el esfuerzo por cumplir con la Resolución 1326 de 2017 no se limite a la recolección, sino que avance hacia una demanda continua de productos circulares. La solución propuesta no solo mitiga la contaminación, sino que también posiciona a Bogotá como un laboratorio de innovación urbana donde la colaboración radical entre sectores permite alcanzar los objetivos globales de sostenibilidad, transformando un problema histórico de salud pública en un motor para el desarrollo tecnológico y la protección del patrimonio ambiental del distrito.

Finalmente, las soluciones propuestas en esta investigación, centradas en alianzas estratégicas y tecnologías como la pirólisis, se basan en la visión del ODS 17 (Alianzas) promovida por el propio CONPES 3918. La creación de modelos de gobernanza que integran a la ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales), el Ministerio del Ambiente y el sector privado permite que la Resolución 1326 de

2017 deje de ser una carga administrativa y se convierta en una oportunidad para la innovación. Al amparo de la Ley 99 de 1993, se propone que la gestión de neumáticos en Bogotá sea un modelo de simbiosis industrial, donde la prevención del daño ambiental genere simultáneamente valor económico y bienestar social.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados del Análisis de la Efectividad Regulatoria y la Capacidad Operativa

El primer hallazgo clave de este estudio fue la identificación de una asimetría operativa entre la normativa escrita y la capacidad de implementación práctica. Los siguientes datos se obtuvieron mediante el análisis de los informes de cumplimiento del Sistema de Reciclaje Selectivo (SRS) y de la Secretaría Distrital de Ambiente:

Aumento de Entidades Obligadas: La inclusión de las llantas de motocicletas y bicicletas mediante la Resolución 1326 generó un aumento del 38 % en el volumen potencial de llantas a recolectar en Bogotá. Sin embargo, los resultados muestran que la infraestructura de los puntos de recolección (puntos amarillos y puntos temporales) solo aumentó un 12 %, lo que generó una sobrecarga logística.

Índice de Falta de Trazabilidad: Se encontró que el 22,5 % de las llantas generadas anualmente en el Distrito Capital no se registran estadísticamente. Esto ocurre principalmente porque el consumidor final entrega los residuos a distribuidores de llantas que no están afiliados a un SRS, rompiendo así la cadena de evidencia exigida por la Ley 99 de 1993.

Tabla 3. Balance de Gestión de NFU en Bogotá (Proyección 2024)

Indicador de Gestión	Valor Esperado (Meta Res. 1326)	Valor Real Obtenido (Análisis)	Brecha de Cumplimiento
Tonelaje Recolectado Anual	163.735,44 Ton/año	94.018,44 Ton/año	17,58%
Puntos de Recolección Autorizados	450 puntos (Proyectado)	285 puntos (Activos)	-36.6%
Participación de Pequeños Actores	100% de Montallantas Reg.	35% de Montallantas Reg.	-65%
Eficiencia de Logística Inversa	Alta (Recogida oportuna)	Media-Baja (Acumulación crítica)	Crítica

Nota: (ANLA, 2025)

5.2. Resultados de la Evaluación de Impacto Ambiental y Riesgos Biofísicos

La evaluación cualitativa y cuantitativa de los impactos ambientales confirmó la urgente necesidad de acción gubernamental en virtud de la Ley 1333 de 2009. En cuanto a la contaminación atmosférica, se encontró que el 70 % de la quema de llantas en Bogotá se realiza en horario nocturno en los distritos de Ciudad Bolívar y Usme, lo que dificulta el monitoreo por parte de las patrullas ambientales. Los resultados del análisis muestran que estas quemas son la principal fuente de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) no industriales en la ciudad y superan los límites de quema recomendados por la OMS en un 140 %.

En cuanto a la contaminación del suelo y el agua, se tomaron muestras de suelo de vertederos clandestinos de neumáticos. Los resultados muestran

concentraciones de zinc y azufre en el suelo circundante cuatro veces superiores a los niveles naturales. Esto inhibe el crecimiento de la vegetación nativa y provoca la acidificación de las vías fluviales cercanas, como los canales que alimentan el río Fucha.

Tabla 4. Caracterización de Impactos y Frecuencia de Ocurrencia

Impacto Ambiental Detectado	Frecuencia de Registro	Severidad del Daño	ODS Afectado
Quema a cielo abierto	Semanal (Zonas periféricas)	Muy Alta	ODS 3 y 11
Arrojo en Canales/Humedales	Estacional (Lluvias)	Alta	ODS 6 y 15
Acopio informal (Vectores)	Permanente	Media-Alta	ODS 3
Contaminación Visual/Paisajismo	Permanente	Media	ODS 11

Nota: (ANLA, 2025)

5.3. Evaluación de Impactos Ambientales

Esta metodología evalúa la Importancia (I) del impacto mediante una fórmula que suma y pondera varios atributos, donde los valores suelen clasificar el impacto como:

- Irrelevante o Compatible: < 25
- Moderado: Entre 25 y 50
- Severo: Entre 50 y 75
- Crítico: > 75

Tabla 5. Evaluación de impactos bajo la metodología CONESA Antes y después de la resolución 1326 de 2017.

Impacto Ambiental	1. Contaminación Visual (Abandono en calle)		2. Proliferación de Vectores (Dengue/Zika)		3. Emisión de Gases (Quemas ilegales)		4. Saturación de Suelo (Relleno Sanitario)		5. Agotamiento de Recursos (Uso de crudo)		
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	
Esc. (Antes/ Después)											
IN	8	2	10	4	12	2	6	2	4	1	
EX	4	1	4	2	2	1	4	1	8	1	
MO	4	2	4	4	4	1	2	1	1	1	
PE	4	2	2	1	2	1	4	4	4	1	
RV	2	1	2	1	4	1	4	1	4	1	
SI	2	1	4	1	4	1	2	1	1	1	
AC	2	1	4	1	4	1	4	2	4	1	
EF	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	
PR	4	2	4	2	4	1	4	1	4	1	
MC	2	1	2	1	8	1	8	1	8	1	
Importancia (I)	56	21	64	31	74	19	60	23	55	13	
Categoría	Severo	Irrelevante	Severo	Moderado	Severo	Irrelevante	Severo	Irrelevante	Severo	Irrelevante	

Nota: (Autor, 2026).

Leyenda de siglas:

IN: Intensidad

RV: Reversibilidad

PR: Periodicidad

EX: Extensión

SI: Sinergia

MC: Recuperabilidad

MO: Momento

AC: Acumulación

PE: Persistencia

EF: Efecto

Utilizando la metodología CONESA, evaluamos los impactos ambientales antes y después de la implementación de la Resolución 1326 de 2017 y se extrajeron las siguientes conclusiones:

Contaminación visual (I: 56 > 21): Antes de la Resolución 1326, las llantas de motocicleta no estaban sujetas a recolección obligatoria y, por lo tanto, eran visibles en cada esquina. Con la introducción de la recolección obligatoria, la intensidad (IN) y la frecuencia (PR) disminuyeron drásticamente.

Vectores y salud pública (I: 64 > 31): Este impacto sigue siendo moderado, ya que Bogotá, a pesar del aumento en la recolección, cuenta con numerosos talleres informales de reparación de llantas que continúan siendo criaderos de mosquitos durante la temporada de lluvias, cuando no se dispone de un sistema de recolección rápido (tiempo – MO).

Emisiones de procesos de combustión (I: 74 > 19): Este es el cambio más significativo. La ley de 2017 fortaleció la supervisión por parte de la ANLA (Agencia Nacional de Licencias Ambientales) y la Policía Ambiental. La calidad del aire (MC) es prácticamente nula (puntuación 8), por lo que evitar la incineración es la única forma de reducir su impacto.

Ocupación del vertedero de Doña Juana (I: 60 > 23): Anteriormente, muchos neumáticos se enterraban ilegalmente o se mezclaban con otros residuos. La ordenanza de 2017 prohíbe explícitamente esta práctica y promueve la reutilización, lo que hace que el impacto en el suelo sea insignificante hoy en día.

Consumo de recursos (I: 55 > 13): Aquí evaluamos el impacto de la producción de caucho nuevo en comparación con el uso de caucho reciclado. Al utilizar caucho reciclado en las carreteras de Bogotá, se elimina la presión sobre el recurso natural (petróleo para polímeros) en la cadena de suministro local, minimizando así el impacto.

El cambio normativo permitió a Bogotá pasar de un estado de emergencia ambiental permanente (puntuaciones > 50) a un estado de gestión controlada (puntuaciones < 25) en casi todas las categorías. El éxito de la Resolución 1326 de 2017 radica en que se centró en la expansión (EX) y la persistencia (PE) de los

neumáticos en entornos urbanos, los cálculos relacionados en la anterior tabla se pueden evidenciar en [el Anexo A](#).

5.4. Análisis de Efectividad de los Mecanismos de la Resolución 1326 en Bogotá

Esta sección evalúa los mecanismos funcionales (logística de recogida, reciclaje y puntos de acopio).

Eficacia de la recogida: Bogotá genera aproximadamente 94.018,44 toneladas de neumáticos usados al año. Según los informes analizados del SRS (Sistema de Reciclaje Sostenible), la eficacia del reciclaje para el periodo 2023-2024 fue del 57,42 %. Esto significa que el mecanismo es parcialmente eficaz, ya que el 17,58 % de los neumáticos usados terminan en el mercado negro o se desechan ilegalmente (ANLA, 2025).

Logística de recogida: El sistema de puntos de acopio es eficiente para los usuarios institucionales, pero presenta una debilidad técnica en cuanto a su alcance: los pequeños distribuidores de neumáticos en zonas como Kennedy o Bosa no están conectados formalmente, lo que genera deficiencias en la trazabilidad de los residuos.

5.5. Contribución a la Economía Circular y Cumplimiento de ODS

La efectividad de la regulación también se mide por su capacidad para transformar los residuos en recursos:

Transformación de materiales (ODS 12): Se constató que el 10% del caucho recolectado en Bogotá, de conformidad con la Resolución 1326, se destina a la producción de granulado de caucho reciclado (GCR). La implementación de la Ley 2087 de 2021 en las calles de la capital es el indicador más importante del éxito de la economía circular (ANLA, 2025).

Fortalecimiento institucional (ODS 17): Las alianzas entre la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito y los proveedores de servicios regionales (PSR) han posibilitado campañas de recolección de neumáticos que, si bien son muy efectivas en términos de volumen de recolección, rara vez se realizan con regularidad.

5.6. Identificación de Oportunidades de Mejora y Brechas Críticas

A partir de la evaluación de impactos y efectividad, se identifican los siguientes cuellos de botella técnicos:

Invisibilidad del flujo informal: La norma no ejerce control suficiente sobre el transportador informal, quien desvía el residuo hacia usos no permitidos (quema en hornos artesanales).

Limitación Tecnológica: La dependencia de la trituración mecánica. Se identifica la Pirólisis como una oportunidad de mejora para diversificar la oferta energética y cumplir con las metas de 2030. Una simulación técnica de una planta de pirólisis en Bogotá arrojó una eficiencia del 85 %. Esto significa que se pueden recuperar 400 kg de aceite de pirólisis, 350 kg de negro de humo y 150 kg de acero de cada tonelada de llantas usadas (Cabrera Reyes & Galarza Prado, 2024).

Se ha confirmado que añadir un 10 % de GCR a la mezcla asfáltica reduce el agrietamiento por fatiga en un 25 % y prolonga la vida útil de la carretera en tres años, en comparación con el asfalto convencional. Sin embargo, un análisis de costos muestra que el GCR es un 18 % más caro debido a la falta de subsidios o exenciones fiscales para el transporte de llantas usadas desde los puntos de recolección hasta las plantas de trituración (Cabrera Reyes & Galarza Prado, 2024).

6. CONCLUSIONES

La evaluación de la gestión de neumáticos fuera de uso en Bogotá reveló que la eficacia de la Resolución 1326 de 2017 está estrechamente relacionada con su capacidad para servir como herramienta para alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 de la ONU. Mientras la regulación se centre principalmente en la responsabilidad de los grandes fabricantes, persistirá un flujo de residuos incontrolado, lo que agravará aún más la contaminación en las zonas periféricas de la ciudad. Esto se debe a la falta de incentivos concretos para los usuarios finales. Al carecer de un sistema de recogida sencillo, recurren a métodos informales de disposición, lo que altera la cadena ambiental y obstaculiza el objetivo de la Agenda 2030 de una gestión ambientalmente racional de los residuos.

El estudio identificó un problema importante en la falta de transparencia e inconsistencia de los datos sobre la recolección de residuos en las zonas más críticas. Para superar esta limitación, se empleó un método de triangulación de información, comparando los informes oficiales de cumplimiento con el inventario de vertederos ilegales críticos elaborado por las autoridades locales. Esta solución proporcionó una visión objetiva de la “pérdida” de residuos y confirmó que el problema no radica en una falta de infraestructura de recolección, sino en una falla de producción y consumo responsable, donde el usuario final del neumático no reconoce su papel en la gestión integral del ciclo de vida del producto.

En cuanto al valor agregado de los materiales, se concluye que el uso continuo de caucho granulado no se ve afectado por la falta de propiedades mecánicas, sino que representa una ventaja competitiva económica para las empresas emergentes. La investigación revela que la Ley 2087 de 2021 exige una

autoridad técnica reguladora con las máximas facultades para salvaguardar la demanda internacional. La solución implementada para controlar el modelo de pirólisis se basa en su capacidad para convertir residuos en subproductos altamente industriales y ofrece una técnica probada para maximizar la eficiencia de recursión de acuerdo con los requisitos del ODS 12.

Finalmente, el dictamen establece que la estabilidad del sistema en Bogotá depende de un gobierno digital que incorpore las Alianzas para el Logro de ODS 17, es necesario que la implementación de tecnologías centralizadas requiera una respuesta técnica para abordar las preocupaciones sobre seguridad de la información a nivel estatal, industrial y municipal. Esta integración técnica no sólo apunta a cumplir con estándares normativos, sino también a cambiar la percepción sobre el uso del neumático, pues ya no se trata de un residuo que debe ser considerado como un material estratégico, sino que el Distrito Capital debe promover previamente la cooperación multilateral para mitigar ese impacto ambiental de largo plazo.

7. RECOMENDACIONES

La gestión de neumáticos al final de su vida útil es un tema clave en Bogotá, ya que su disposición inadecuada puede tener importantes impactos ambientales y en la salud pública. Para abordar este problema, se presentan las siguientes recomendaciones y planes de trabajo futuros para fortalecer la gestión de neumáticos al final de su vida útil en Bogotá.

En primer lugar, es fundamental fortalecer la infraestructura de investigación y desarrollo para garantizar la viabilidad de las soluciones propuestas, como la pirólisis y los procesos de reciclaje avanzado. Esto requiere la creación de

laboratorios acreditados según la norma ISO/IEC 17025, equipados con instrumentos de caracterización térmica y cromatografía de gases para certificar la calidad del aceite de pirólisis y el negro de humo recuperado. Además, la creación de un centro de pruebas de materiales asfálticos permitiría la estandarización de mezclas que contienen granulado de caucho reciclado (RGM) en las diversas condiciones climáticas de la capital y reduciría la incertidumbre técnica para las empresas constructoras.

La digitalización y la monitorización tecnológica también desempeñan un papel crucial en la gestión de neumáticos al final de su vida útil. El desarrollo de software de trazabilidad basado en Blockchain y Big data permitiría la monitorización en tiempo real del flujo de residuos y garantizaría la integración con el registro de neumáticos usados de la agencia ambiental. El uso de algoritmos de inteligencia artificial para predecir puntos críticos de disposición ilegal de residuos dentro de la ciudad permitiría a las autoridades implementar medidas preventivas y optimizar las rutas de recolección para la recolección selectiva de residuos.

Desde una perspectiva de política pública, establecer una bolsa de subproductos de NFU facilitaría el contacto directo entre los gestores de neumáticos y las industrias que requieren acero, fibras o caucho, eliminando así los costos de intermediación. Es fundamental que el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) y la UAESP (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos) modernicen la infraestructura de los puntos de acopio temporal (CAT) para que funcionen no solo como puntos de transbordo, sino también como centros de preprocesamiento y clasificación. Esto reduciría el volumen de transporte y las emisiones de CO₂ asociadas a la logística inversa.

La investigación sobre la aplicación de la nanotecnología al caucho reciclado podría mejorar sus propiedades elásticas y su resistencia a los rayos UV, ampliando así el mercado a las industrias automotriz y del calzado. Además, es importante realizar análisis comparativos del ciclo de vida (ACV) entre la pirólisis y el co-reciclaje térmico en el contexto específico de la sabana de Bogotá para cuantificar con precisión la reducción en toneladas de CO₂ equivalente y su contribución exacta a los objetivos de descarbonización de Colombia para 2050.

La formalización del sector informal (montallantas) es crucial para una gestión eficaz de los neumáticos fuera de uso. El desarrollo de programas de capacitación técnica y certificación para estos trabajadores es fundamental para su integración educativa y profesional. Se propone que el SENA, en colaboración con el distrito, desarrolle un currículo específico para la "Economía Circular con Polímeros" con el fin de profesionalizar este oficio en las zonas más afectadas por la contaminación ambiental.

En cuanto a la Resolución 1326 de 2017, se recomienda ampliar su alcance a los neumáticos de motocicletas y bicicletas dentro del sistema de recolección selectiva y gestión ambiental. Establecer objetivos de recolección más ambiciosos para alcanzar los objetivos de descarbonización de Colombia para 2050 también es esencial. Crear incentivos para la recolección y el reciclaje de neumáticos usados, junto con la implementación de un sistema de monitoreo y control más eficaz, son medidas necesarias para prevenir el vertido ilegal de neumáticos usados en la ciudad. Finalmente, promover la educación y la concienciación ambiental mediante campañas de sensibilización ciudadana es crucial para aumentar la recolección y el reciclaje de neumáticos usados en la ciudad.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANLA. (2025). *Informe de Gestión Responsabilidad Extendida del Productor*. Bogotá. Obtenido de <https://www.ambientebogota.gov.co/llantas-usadas>
- Cabrera Reyes, F. E., & Galarza Prado, B. I. (2024). *Análisis de desempeño del uso de grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas para mejorar la resistencia a la fatiga*. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/45563>
- Caicedo Pulido, P. Y. (20 de 11 de 2025). *Diseño de una estrategia para utilizar datos de monitoreo de Black Carbon como indicadores de las políticas públicas de calidad de aire, cambio climático y salud pública en Bogotá*. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/89275>
- Chaname Yafac, K. D. (2024). *Vulneración del derecho a la salud por contaminación de residuos sólidos y deficiente gestión ambiental en el distrito de Chiclayo*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12423/8128>
- García, F. N. (2025). *Responsabilidad social corporativa. Teoría y práctica de la sostenibilidad*. . Esic.
- Hualpa, J. A. (2025). *Evaluación económico-financiera de un plan de negocios para instalar una planta de reciclado de neumáticos fuera de uso (NFU) en la ciudad de Salta*. Obtenido de https://bibliotecas.ucasal.edu.ar/opac_css/index.php?lvl=cmspage&pageid=24&id_notice=80412
- Ibarra Vega, D., & Osorno Osorio, G. M. (2025). *Trazabilidad en la gestión de operaciones y la cadena de abastecimiento de los planes colectivos colombianos enmarcados en la responsabilidad extendida del productor*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10495/46222>
- Jaramillo Gallo, B. (2023). *Estrategia operativa para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del Distrito de Medellín, en el marco de la política pública de economía circular*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10495/36402>
- Lizarazo Gómez, J. C. (2024). *Propuesta de aprovechamiento de llantas usadas de bicicleta para la fabricación de estoperoles viales*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9743>
- Lopez Sobrado, V. V. (2023). *Propuesta de un plan de gestión para el reaprovechamiento de los neumáticos usados procedentes de las vulcanizadoras del distrito de Huánuco - 2023*. Obtenido de <http://repositorio.udh.edu.pe/20.500.14257/4609>
- Ocampo Gutiérrez, L. (18 de 09 de 2025). *Transición hacia la sostenibilidad: estrategias para la implementación de la economía circular en pymes en la*

- ciudad de Bogotá D.C.* Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/75546>
- Peña Porras, D. I. (2024). *El control urbano en Bogotá: contexto histórico y jurídico de sus antecedentes en el paso del urbanismo a la planeación urbana 1950 - 2020*. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/88097>
- Quio Rubina, K. A. (2025). *Fiscalización ambiental en el manejo de residuos sólidos de la provincia de Coronel Portillo*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14621/7906>
- sostenible, M. d. (2017). *Resolución 1326 de 2017*.
- Tapia, G., Miliá, D., Feldman, G., Sánchez, G. L., Ruíz Díaz, D., Balmaceda, M., . . . Andrada, I. A. (2025). *RECICLADO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO. VALUACIÓN ECONÓMICA SOCIAL Y AMBIENTAL*. Obtenido de http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/libros/Tapia_Desarrollo-estrategico-sustentable.pdf
- Trujillo Angulo, A. C. (2024). *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.* Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9745>
- Vásquez Velásquez, L. V., & Muñoz Ospina, I. C. (26 de 08 de 2025). Obtenido de <https://hdl.handle.net/10901/31869>
- Vesga Ferreira, J. C. (01 de 12 de 2025). *Propuesta de modelo de logística inversa para la gestión sostenible de residuos sólidos de madera en cens S.A. E.S.P.* Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/76226>

9. ANEXOS

A. Cálculos de los impactos relacionados en la matriz CONESA

Cálculos de los impactos

$$I = 3(IN) + 2(EX) + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC$$

1. Contaminación Visual (Abandono en calle)

$$\text{Escenario A: } I = [3(8) + 2(4) + 4 + 4 + 2 + 2 + 2 + 4 + 4 + 2] = 24 + 8 + 24 = 56 \text{ (Severo)}$$

$$\text{Escenario D: } I = [3(2) + 2(1) + 2 + 2 + 1 + 1 + 1 + 4 + 2 + 1] = 6 + 2 + 13 = 21 \text{ (Irrelevante)}$$

2. Proliferación de Vectores (Dengue/Zika)

$$\text{Escenario A: } I = [3(10) + 2(4) + 4 + 2 + 2 + 4 + 4 + 4 + 4 + 2] = 30 + 8 + 26 = 64 \text{ (Severo)}$$

$$\text{Escenario D: } I = [3(4) + 2(2) + 4 + 1 + 1 + 1 + 1 + 4 + 2 + 1] = 12 + 4 + 15 = 31 \text{ (Moderado)}$$

3. Emisión de Gases (Quemas ilegales)

$$\text{Escenario A: } I = [3(12) + 2(2) + 4 + 2 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 8] = 36 + 4 + 34 = 74 \text{ (Severo)}$$

$$\text{Escenario D: } I = [3(2) + 2(1) + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 4 + 1 + 1] = 6 + 2 + 11 = 19 \text{ (Irrelevante)}$$

4. Saturación de Suelo (Relleno Sanitario)

$$\text{Escenario A: } I = [3(6) + 2(4) + 2 + 4 + 4 + 2 + 4 + 4 + 4 + 8] = 18 + 8 + 34 = 60 \text{ (Severo)}$$

$$\text{Escenario D: } I = [3(2) + 2(1) + 1 + 4 + 1 + 1 + 2 + 4 + 1 + 1] = 6 + 2 + 15 = 23 \text{ (Irrelevante)}$$

5. Agotamiento de Recursos (Uso de crudo)

$$\text{Escenario A: } I = [3(4) + 2(8) + 1 + 4 + 4 + 1 + 4 + 1 + 4 + 8] = 12 + 16 + 27 = 55 \text{ (Severo)}$$

$$\text{Escenario D: } I = [3(1) + 2(1) + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1] = 3 + 2 + 8 = 13 \text{ (Irrelevante)}$$

Nota: (Autor, 2026).