



Revisión Bibliográfica sobre el Diseño y Producción de Mezclas Asfálticas
con Caucho Reciclado desde 2020 en Boyacá

Giovanny Camelo Pinzón

Programa de Ingeniería Civil
Facultad de ingeniería Ambiental y Civil
Universidad Antonio Nariño
Duitama
2024

Revisión Bibliográfica sobre el Diseño y Producción de Mezclas Asfálticas
con Caucho Reciclado desde 2020 en Boyacá

Giovanny Camelo Pinzón

Documento presentado como requisito para optar por el título de:
Ingeniero Civil

Directores: Msc. Erika Lorena Becerra Becerra

Programa de Ingeniería Civil
Facultad de ingeniería Ambiental y Civil
Universidad Antonio Nariño
Duitama.
2024

"REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON CAUCHO RECICLADO DESDE 2020"

BIBLIOGRAPHIC REVIEW OF THE DESIGN AND PRODUCTION OF ASPHALT MIXES WITH RECYCLED RUBBER SINCE 2020

Becerra Becerra, Erika Lorena¹; Camelo Pinzón Giovanny²

¹ Universidad Antonio Nariño, Colombia, ebecerra84@uan.edu.co

² Universidad Antonio Nariño, Colombia, gcamelo66@uan.edu.co

Resumen

Esta investigación acerca del empleo de grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas en Boyacá, Colombia, ha presentado diversos descubrimientos esenciales. A partir de 2020, se ha notado un incremento en la utilización de estas mezclas, evidenciando un creciente conocimiento ecológico y un interés por soluciones sustentables para la infraestructura de las vías. Las combinaciones con GCR han evidenciado avances notables en la conservación del pavimento, incluyendo una mayor resistencia al desgaste y una deformación reducida, lo que indica una vida útil extensa y una disminución de los gastos de mantenimiento.

Además, la aplicación de GCR ha ayudado a disminuir los desechos de ruedas, respaldando metas ecológicas y de sostenibilidad. No obstante, el estudio también ha revelado retos técnicos y financieros, tales como la variabilidad en la calidad de la goma reciclada y los gastos extra en su elaboración. Pese a estos desafíos, las futuras oportunidades son alentadoras, con un posible crecimiento propulsado por políticas de sostenibilidad y progresos tecnológicos. El estudio determina que, con un método apropiado, las combinaciones asfálticas con GCR pueden proporcionar una alternativa eficaz y sustentable para la edificación de pavimentos en la zona.

La metodología utilizada en este estudio, se presenta como una investigación cuantitativa y no experimental, enfocada en el estudio de datos secundarios derivados de estudios anteriores.

Palabras claves: Asfalto modificado, Caucho reciclado, Mezclas asfálticas, Sostenibilidad, Durabilidad

Abstract

This research on the use of recycled rubber grain (RCG) in asphalt mixtures in Boyacá, Colombia, has presented several essential discoveries. As of 2020, an increase in the use of these mixtures has been noted, evidencing growing ecological knowledge and interest in sustainable solutions for road infrastructure. Combinations with GCR have shown notable advances in pavement preservation, including increased wear resistance and reduced deformation, indicating extended useful life and decreased maintenance costs.

Additionally, the application of GCR has helped decrease wheel waste, supporting green and sustainability goals. However, the study has also revealed technical and financial challenges, such as the variability in the quality of recycled rubber and the extra costs in its production. Despite these challenges, future opportunities are encouraging, with possible growth driven by sustainability policies and technological progress. The study determines that, with an appropriate method, asphalt combinations with GCR can provide an effective and sustainable alternative for the construction of pavements in the area.

The methodology used in this study is presented as a quantitative and non-experimental research, focused on the study of secondary data derived from previous studies.

Keywords: Modified asphalt, Recycled rubber, Asphalt mixtures, Sustainability, Durability

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de grado se centra en la incorporación de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas, con un enfoque específico en su aplicación en Boyacá, Colombia. La creciente

necesidad de soluciones sostenibles para la gestión de desechos de neumáticos motiva esta investigación, considerando el impacto ambiental significativo de los neumáticos usados (Peláez et al., 2017, p. 34). La aplicación de GCR en el asfalto surge como una opción con gran potencial tanto para disminuir este impacto como para potenciar las características del material asfáltico (Hoyos et al., 2021, p. 17).

El interrogante principal de este estudio es de qué manera la incorporación de GCR en las mezclas asfálticas puede afectar la durabilidad y sostenibilidad de las pavimentaciones en Boyacá. Este problema es significativo ya que las vías en la región se encuentran con retos singulares debido a su clima, topografía y volumen de vehículos. Es esencial analizar el efecto del GCR en aspectos como la resistencia al agotamiento, las deformaciones permanentes y los gastos de mantenimiento para mejorar la infraestructura de las vías locales.

Los hallazgos iniciales indican que la aplicación de GCR ha demostrado avances notables en la duración y sostenibilidad de las mezclas asfálticas. Estos descubrimientos señalan que la implementación del GCR podría cambiar los métodos de pavimentación en Boyacá, enfrentando tanto los retos medioambientales como técnicos de la zona. Además, resalta la importancia de ajustar las mezclas asfálticas con GCR a las condiciones particulares de Boyacá, teniendo en cuenta elementos como la variabilidad climática y las particularidades del tráfico (Valdés et al., 2012, p. 93). El estudio finaliza ofreciendo sugerencias para la aplicación eficaz del GCR, proponiendo una cooperación entre autoridades locales, empresas y centros de investigación para la creación y validación de protocolos concretos. Este método tiene como objetivo promover una transición hacia métodos de pavimentación más sustentables y optimizar y perfeccionar estas prácticas de la infraestructura vial en Boyacá.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las últimas décadas, el manejo inadecuado de llantas usadas ha emergido como un desafío ambiental significativo a nivel global (Guevara, et al., 2020, p. 25), y la región de Boyacá no es una excepción. La acumulación masiva de llantas desechadas en vertederos no solo

contribuye a la contaminación del suelo y el agua, sino que también representa un riesgo para la salud pública debido a la proliferación de plagas y la liberación de compuestos tóxicos durante su lenta descomposición (Saez & Urdaneta, 2014, p. 132). En Boyacá, la gestión de estos residuos ha llevado a la búsqueda de soluciones innovadoras que permitan su reutilización efectiva, minimizando su impacto ambiental local.

Dentro de las opciones innovadoras para el manejo de ruedas usadas, la inclusión de grano de caucho reciclado (GCR) en la elaboración de mezclas asfálticas se ha presentado como una alternativa con gran potencial. Los GCR, Dentro de las opciones innovadoras para el manejo de ruedas usadas, la inclusión de grano de caucho reciclado (GCR) en la elaboración de mezclas asfálticas ha surgido como una alternativa con gran potencial (Leal & Torres, 2019, p.39). El GCR, producto del reciclaje de ruedas usadas, se sugiere como un aditivo para potenciar las características del asfalto y, simultáneamente, ofrecer un camino para la gestión sostenible de los residuos de goma en la zona. Esta metodología tiene la capacidad de disminuir la necesidad de materiales vírgenes, minimizar la acumulación de residuos y potenciar el desempeño de las pavimentaciones asfálticas en las condiciones particulares de Boyacá (Guzman, et al., 2021, p.7).

A partir del 2020, ha habido un aumento en la investigación y la puesta en marcha de mezclas asfálticas modificadas con GCR a escala nacional (Rondón, et al., 2008, p.17), incluyendo en Boyacá. Estas investigaciones han evidenciado avances en diversas características del asfalto, tales como su resistencia al desgaste, la disminución de deformaciones permanentes y la optimización en la adhesión de la mezcla. No obstante, aún existen diversas interrogantes respecto a la efectividad y factibilidad a largo plazo de estas mezclas en el escenario local. Los retos detectados abarcan la longevidad y el desempeño del GCR en diferentes condiciones climáticas y de tráfico en Boyacá, los gastos extra relacionados con el procesamiento del GCR, la ausencia de normas uniformes para su fabricación en la zona, y la exigencia de valorar el impacto ambiental global del procedimiento. En este contexto, se plantea la siguiente interrogante de investigación: ¿Qué progresos y retos se han detectado en el diseño y fabricación de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado desde el

año 2020 en Boyacá, y cómo se puede perfeccionar su aplicación para potenciar sus ventajas técnicas y medioambientales?

El objetivo de esta investigación es realizar un análisis bibliográfico detallado que recoja y examine los progresos más recientes en el diseño y fabricación de mezclas asfálticas que incluyen caucho reciclado desde el año 2020, poniendo especial atención en Boyacá. El propósito de este estudio es reconocer las mejores prácticas ajustadas a las circunstancias locales, valorar los retos técnicos y financieros vinculados a la aplicación de estas mezclas en la zona, y ofrecer sugerencias estratégicas para mejorar su aplicación en proyectos de infraestructura vial en Boyacá. La investigación toma en cuenta tanto el efecto medioambiental de reutilizar el caucho reciclado como su factibilidad técnica y financiera en el escenario regional.

Este análisis es de vital relevancia para Boyacá, dado que trata un importante problema medioambiental y aspira a aportar a la sostenibilidad en la infraestructura de carreteras de la región. Mediante el fomento de la economía circular en la edificación de pavimentos, se proporciona una alternativa eficaz para el reaprovechamiento de ruedas usadas, en consonancia con las tendencias actuales hacia prácticas más sustentables y responsables en la ingeniería civil de la región.

La necesidad identificada es doble, Boyacá se enfrenta a un serio reto medioambiental a causa de la acumulación de neumáticos sin uso, lo que afecta negativamente la salud pública y el medio ambiente; por otro lado, la región también necesita soluciones innovadoras para optimizar la infraestructura de carreteras. La aplicación de grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas constituye una opción eficiente para tratar ambos problemas al mismo tiempo. No obstante, la puesta en marcha de esta tecnología se topa con múltiples desafíos técnicos, financieros y regulatorios que necesitan ser vencidos para que Boyacá pueda sacar el máximo provecho de sus ventajas en aspectos de sostenibilidad, disminución de gastos y optimización de la infraestructura vial.

JUSTIFICACION

La creciente inquietud sobre el efecto medioambiental de los residuos y la búsqueda de opciones sustentables para la construcción de infraestructura vial, han generado un interés en retomar la utilización de materiales reciclados, como el caucho, en la elaboración de mezclas asfálticas.

Esta monografía tiene como objetivo llevar a cabo una revisión bibliográfica de los progresos e implementación de estas tecnologías en Boyacá desde el año 2020, con el objetivo de aportar al alcance y avance de prácticas más sustentables en el campo de la ingeniería civil.

Boyacá cuenta con una gran diversidad geográfica y climática, el cual sirve de escenario ideal para realizar una investigación sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas con la adición de caucho reciclado. Estudiar la aplicación en esta región permitirá adaptar las técnicas y materiales a las condiciones locales fomentando el desarrollo de soluciones innovadoras en infraestructura.

Al promover el uso de materiales reciclados se crea un impacto social y económico que contribuye a la economía circular y esto no solo beneficia al medio ambiente sino, que también puede generar empleo y desarrollo en la comunidad.

Este documento puede servir como base para propuestas que integren aspectos económicos y sociales en proyectos de infraestructura y también pretende ser un aporte significativo al desarrollo sostenible de Boyacá, vinculándose con las tendencias globales de economía circular y cuidado ambiental.

ESTADO DEL ARTE

El empleo de caucho reciclado en mezclas asfálticas ha sido el centro de una creciente investigación en años recientes, impulsado por la necesidad de disminuir el impacto ecológico de los desechos de ruedas usadas y potenciar el desempeño de los pavimentos. A partir de 2020, se ha notado un incremento en las investigaciones relacionadas con el diseño

y fabricación de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado (Hoyos, et al., 2021, p. 18).

Como señalan Hoyos, et al. (2021), el caucho reciclado ha sido incluido en las mezclas asfálticas como un agente modificador del betún, optimizando atributos fundamentales como la resistencia al desgaste, las deformaciones permanentes y la longevidad del pavimento (p. 5). Adicionalmente, la tecnología de modificación con caucho ha facilitado la disminución del espesor requerido de las capas asfálticas, lo que implica una reducción en el uso de materiales y, en consecuencia, en los gastos de edificación (Bobadilla, et al., 2022, p. 102).

El uso de GCR en las mezclas asfálticas contribuye a la reducción de residuos de caucho en vertederos y reduce la huella de carbono del proceso de pavimentación, siendo una solución económicamente viable, especialmente en cuanto a los ahorros en costos de mantenimiento a largo plazo (Urian, 2021, p. 54).

A nivel internacional, las normativas y especificaciones técnicas han evolucionado para incluir el uso de mezclas asfálticas con GCR en proyectos de infraestructura vial. Esto ha impulsado la adopción de esta tecnología en diversos países, fomentando el desarrollo de estudios comparativos y experimentales que buscan establecer los parámetros óptimos para su aplicación en diferentes contextos geográficos y climáticos.

En conclusión, la situación actual respecto al empleo de caucho reciclado en mezclas asfálticas muestra un escenario de adopción y mejora constante de esta tecnología, resaltando su superior desempeño técnico en relación a los asfaltos tradicionales. No obstante, aún existen retos vinculados con la normalización de las mezclas y la adaptación a las circunstancias locales, que continúan siendo campos fundamentales de investigación para el porvenir.

MARCOS REFERENCIALES

El marco referencial ofrece el fundamento teórico y contextual que respalda este estudio, tratando todos los elementos esenciales para su entendimiento. Primero, el marco teórico se

enfocará en las teorías, modelos y enfoques más relevantes vinculados al tema, facilitando la identificación de los progresos y las lagunas en el saber existente. Después, el marco conceptual establecerá los conceptos fundamentales y las categorías de análisis que se emplearán durante el trabajo, asegurando claridad y consistencia en su desarrollo. En el contexto legal, se expondrán las leyes, regulaciones y disposiciones actuales que rigen el campo de estudio, ofreciendo una visión jurídica robusta y al día. En última instancia, el marco institucional detallará las estructuras organizativas, políticas y económicas que inciden o están vinculadas con el fenómeno estudiado, proporcionando una visión integral del contexto en el que se ubica la investigación. Todo este conjunto de marcos fortalece la rigurosidad académica y la profundidad del análisis que se realizará.

MARCO GEOGRAFICO

Esta monografía se enfoca geográficamente en Boyacá, un departamento situado en el centro de Colombia, lo que lo convierte en un lugar crucial para la investigación y uso de mezclas asfálticas con caucho reciclado. Las particularidades geográficas, climáticas y socioeconómicas de la región hacen que la investigación sea no solo relevante, sino imprescindible para analizar los desafíos presentes en infraestructura vial y sostenibilidad ambiental.

El paisaje de Boyacá es diverso, incluyendo montañas, valles y planicies. Esto afecta las circunstancias de edificación y el funcionamiento de las mezclas asfálticas.

MARCO CONCEPTUAL

El enfoque teórico de este proyecto se centra en ofrecer los conceptos y principios fundamentales acerca de los pavimentos asfálticos y la reutilización de goma reciclada. En esta sección, se examinarán los procedimientos de fabricación y estructuración de mezclas asfálticas, resaltando las propiedades y atributos de los materiales asfálticos convencionales y los beneficios de incluir goma reciclada. Además, se investigarán los factores técnicos y ambientales vinculados a esta práctica, tales como la longevidad de los pavimentos, la disminución de desechos y la optimización en el rendimiento estructural y térmico de las

mezclas. Este estudio facilitará la base del estudio en el saber existente y valorar las posibles ventajas de incorporar el caucho reciclado en la infraestructura de las vías.

Mezclas Asfálticas

Las combinaciones asfálticas son sustancias compuestas que incluyen un compuesto de partículas minerales y un ligante bituminoso, a menudo referido como asfalto (Alvarez & Ovalles, 2012, p. 117). Estas combinaciones se utilizan en la edificación y restauración de vías por sus características físicas, tales como la resistencia a la compresión, flexibilidad y durabilidad. El rendimiento de los pavimentos asfálticos está determinado por factores como la calidad de los materiales, el diseño estructural y la correcta instalación. Como menciona Ospino, et al., (2017) las deformaciones permanentes, la fatiga, y el envejecimiento prematuro son algunos de los problemas más comunes que afectan el rendimiento de los pavimentos asfálticos (p. 7).

Modificación del Asfalto

La modificación del asfalto surge como una necesidad para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas y hacer frente a problemas como el agrietamiento por fatiga y la deformación plástica (Cruz, et al., 2021). El uso de polímeros, fibras y otros aditivos en el asfalto ha demostrado ser efectivo para mejorar la cohesión y flexibilidad del material, aumentando la resistencia de las carreteras al tránsito pesado y a condiciones climáticas extremas.

Uno de los enfoques más innovadores en los últimos años ha sido la adición de grano de caucho reciclado (GCR) al asfalto. El GCR es un subproducto del proceso de reciclaje de llantas usadas, que, al ser añadido al asfalto, actúa como un modificador que mejora las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, tales como su elasticidad, resistencia a la fatiga, deformación y envejecimiento (Diaz & Castro, 2017, p. 43).

Caucho Reciclado en Mezclas Asfálticas

El caucho reciclado proviene principalmente de llantas fuera de uso que, mediante procesos de molienda, se convierten en gránulos o polvo de caucho (GCR). Estos gránulos se incorporan en la mezcla asfáltica como un modificador del betún, mejorando su comportamiento mecánico (Reyes, Fuentes, & Moreno, 2013, p. 168). La adición de caucho reciclado permite incrementar la elasticidad de la mezcla, lo que reduce la aparición de grietas y deformaciones permanentes bajo cargas repetitivas, además de proporcionar una mejor resistencia a los cambios de temperatura.

Este enfoque no solo mejora el rendimiento del pavimento, sino que también es ambientalmente beneficioso al contribuir a la reducción de residuos sólidos y la reutilización de materiales que de otro modo se acumularían en los vertederos.

Propiedades de las Mezclas Asfálticas con Caucho Reciclado

Las mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado presentan varias ventajas técnicas. Entre ellas destacan:

- **Resistencia a la Fatiga:** Las mezclas con GCR mejoran significativamente la resistencia a la fatiga, alargando la vida útil del pavimento, ya que soportan mejor las cargas repetitivas impuestas por el tráfico (Figuroa & Fonseca, 2020, p. 25).
- **Reducción de Deformaciones:** Gracias a la elasticidad del caucho, las mezclas asfálticas se vuelven menos susceptibles a deformaciones permanentes, como los surcos, comunes en carreteras con alta densidad de tráfico (Reyes, Madrid, & Salas, 2007, p. 32).
- **Durabilidad:** Al mejorar la resistencia al envejecimiento y a las condiciones climáticas, los pavimentos con GCR son más duraderos que aquellos fabricados con mezclas asfálticas tradicionales (Alarcan, Chaparro, & Sanchez, 2020, p. 17).

Impacto Ambiental y Sostenibilidad

El uso de caucho reciclado en mezclas asfálticas tiene un impacto significativo en la sostenibilidad medioambiental. La reutilización de llantas usadas no solo reduce la acumulación de residuos peligrosos en los vertederos, sino que también disminuye la necesidad de extracción de recursos vírgenes para la producción de nuevos materiales (Peña, 2024, p. 7). Esta solución, además, contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la fabricación de productos asfálticos convencionales.

Además, estudios como una investigación llevada a cabo en 2021 por científicos de la Universidad Nacional de Colombia, las mezclas asfálticas modificadas con GCR mostraron una resistencia superior al desgaste y a las variaciones permanentes provocadas por el tráfico y las diferencias climáticas. Este análisis determinó que las vías asfaltadas con GCR tenían una durabilidad notablemente superior a las tradicionales, lo que conducía a una reducción de los gastos de mantenimiento a largo plazo debido a la menor frecuencia de las reparaciones (Universidad Nacional de Colombia, 2021), han demostrado que el uso de GCR en pavimentos puede reducir los costos de mantenimiento a largo plazo, ya que las carreteras tienden a ser más duraderas y menos propensas a necesitar reparaciones frecuentes.

Normativas y Estándares para el Uso de Caucho Reciclado en Mezclas Asfálticas

El uso de caucho reciclado en mezclas asfálticas ha sido reconocido en diversas normativas internacionales como una solución viable para la construcción de pavimentos. Estas regulaciones se centran en garantizar que las mezclas con GCR cumplan con los requisitos técnicos necesarios para asegurar su durabilidad y seguridad (Campaña & Galeas, 2016, p. 5). Las especificaciones técnicas sobre granulometría, proporción de GCR en la mezcla y métodos de aplicación son aspectos clave regulados en las normativas actuales.

Desafíos y Perspectivas Futuras

Pese a los progresos en la aplicación de GCR en mezclas asfálticas, aún existen ciertos retos. Entre ellos se encuentran la estandarización de los procesos de producción, la adaptación a diferentes condiciones geográficas y climáticas, y la necesidad de desarrollar tecnologías que faciliten una mejor integración del GCR con el asfalto (Herrera, 2022, p. 40). No obstante, la investigación sigue progresando en estos campos, con el objetivo de perfeccionar las técnicas y expandir la utilización de esta tecnología en la edificación de infraestructuras viales más duraderas y sostenibles.

Para finalizar, el marco teórico que respalda la utilización de caucho reciclado en mezclas asfálticas demuestra que se trata de una opción eficaz y sustentable en contraposición a los métodos convencionales de edificación de pavimentos. La innovación en el cambio del asfalto a través de GCR ofrece una oportunidad tanto para optimizar el desempeño técnico de los pavimentos como para tratar problemas medioambientales relacionados con la administración de desechos de caucho.

MARCO LEGAL

En el escenario de Boyacá, la administración de desechos, que incluye el almacenamiento y reutilización de ruedas usadas, se rige por diversas regulaciones que persiguen fomentar la sostenibilidad y la economía circular. A escala nacional, la Ley 1672 de 2013 define un esquema para la administración de desechos de productos de consumo, incluyendo los neumáticos, e impone a los productores la obligación de recoger y reciclar dichos desechos. Esta normativa establece pautas que pueden ser modificadas y utilizadas en Boyacá para tratar de manera específica el problema de las ruedas usadas.

Boyacá ha establecido estrategias en concordancia con la Política Nacional de Manejo Integral de Residuos Sólidos. El Decreto 1077 de 2015 rige la Ley 1672, especificando los procedimientos para el manejo de desechos y fomentando prácticas sustentables en la disposición y reciclaje de neumáticos. Este reglamento subraya la relevancia del reutilizado

y reciclaje, promoviendo la utilización de materiales reciclados en la edificación de infraestructura, incluyendo pavimentos asfálticos. Adicionalmente, el Plan Departamental de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de Boyacá dicta pautas concretas para la zona, centrándose en la disminución, reciclaje y valorización de desechos.

El estudio acerca de la reutilización de ruedas usadas y la inclusión de grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas tiene una relación directa con estas regulaciones. La Ley 1672 y el Decreto 1077 establecen el marco jurídico para la administración y reciclaje de neumáticos, en cambio, el PGIRS de Boyacá proporciona una orientación particular para la puesta en marcha de prácticas sustentables. Estas normativas garantizan que los procedimientos de pavimentación y reutilización de materiales reciclados se realicen correctamente, respetando criterios de calidad, sostenibilidad y seguridad vial (Flores, et al., 2023, p. 104).

Decreto 1076 de 2015 (República de Colombia, 2015), Primer Decreto Regulator del Sector de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Define la necesidad de aplicar estrategias de producción más limpia, que comprenden la utilización de materiales reciclados en el sector de la construcción, ayudando a disminuir el efecto ambiental de los desechos de las ruedas de coches.

Resolución 6981 del 2011 (Ministerio de Transporte, 2011), Reglamentación Técnica para la Creación de Mezclas Asfálticas

Ofrece especificaciones técnicas para la creación de mezclas asfálticas, que incluyen especificaciones para aditivos como el caucho reciclado, asegurando así estándares de durabilidad y resistencia.

Ley 1480 de 2011 (Congreso de la República de Colombia, 2011), Estatuto del Consumidor

Resguarda los derechos de los consumidores, garantizando la calidad y seguridad de productos vinculados a la infraestructura de carreteras, incluyendo mezclas asfálticas alteradas con caucho reciclado.

Decreto 2041 de 2014 (República de Colombia, 2014), Licencias Ambientales

Regula la adquisición de permisos ambientales para actividades que afectan el medio ambiente, como la fabricación de mezclas asfálticas y el reciclaje de ruedas, garantizando el acatamiento de normativas ambientales.

Ley 1672 de 2013 (Congreso de la República de Colombia, 2013), Gestión Ambiental de Llantas Usadas

Fomenta el correcto almacenamiento y reciclado de ruedas usadas, incentivando la implementación de tecnologías vanguardistas, como la inclusión de caucho reciclado en mezclas asfálticas.

Normas de Infraestructura Vial y de Transporte (Ministerio de Transporte de Colombia, 2017)

Emite normativas para la construcción y mantenimiento de infraestructura vial, regulando los materiales y características técnicas, garantizando la seguridad y durabilidad de las carreteras.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Analizar la evolución y las tendencias recientes en el diseño y producción de mezclas asfálticas que incorporan caucho reciclado, a través de una revisión bibliográfica de estudios realizados a partir del año 2020, con el fin de identificar sus beneficios, limitaciones y posibles aplicaciones futuras en la ingeniería vial.

OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Identificar los estudios más relevantes publicados desde el año 2020 que traten sobre el uso de caucho reciclado en la producción de mezclas asfálticas. Buscando en bases de datos académicas los estudios más pertinentes, para conocer el estado actual de la investigación sobre el tema.
- Describir los diferentes métodos de incorporación de caucho reciclado en las mezclas asfálticas, así como sus propiedades y características técnicas. Analizando los diferentes enfoques y características técnicas de las mezclas con caucho reciclado, para entender cómo se aplica el caucho reciclado y cómo afecta a la calidad del asfalto.
- Investigar cómo la utilización de caucho reciclado en mezclas asfálticas impacta tanto el entorno como la economía, conforme a los hallazgos más recientes. Revisando estudios sobre los beneficios ambientales y económicos del uso de caucho reciclado, para evaluar la viabilidad y los beneficios sostenibles de utilizar caucho reciclado en infraestructura vial.

METODOLOGÍA

Tipo de Investigación y Método de Investigación

El estudio es de tipo cuantitativo y no experimental, centrado en examinar datos disponibles acerca del uso de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas mediante un análisis sistemático de investigaciones anteriores, sin una intervención directa.

Procedimientos de la Investigación:

1.Revisión de Literatura: Desde 2020, se llevará a cabo una investigación detallada en bases de datos académicas y fuentes gubernamentales para recolectar investigaciones y documentos relacionados con mezclas asfálticas con GCR.

2. Elección de la Muestra: Se seleccionará una muestra representativa de entre 20 y 30 investigaciones pertinentes que satisfagan los criterios de inclusión, como tipo de estudio que

presenten resultados experimentales también, como su importancia temporal que sean estudios a partir del año 2020, dando prioridad a aquellas con información reciente y diferentes métodos sobre GCR en asfalto.

3.Análisis de Datos: Se examinarán factores como la durabilidad del asfalto, la sostenibilidad del medio ambiente, los gastos de mantenimiento, las características del asfalto y la conformidad con las regulaciones. Se comparará y condensará la información recolectada.

4.Síntesis y Elaboración de Conclusiones: Mediante el estudio de los datos, se elaborarán conclusiones acerca de los impactos ambientales y económicos del uso de GCR, resaltando los descubrimientos más significativos y sus consecuencias para futuros estudios. Se reconocerán los hallazgos principales, tanto las ventajas como las restricciones de la utilización de caucho reciclado en mezclas asfálticas, y se debatirá su repercusión en el contexto ambiental y económico.

Tipo de Muestreo:

Por conveniencia, se utilizará un muestreo no probabilístico, escogiendo investigaciones accesibles que satisfagan los criterios establecidos, dando prioridad a las que han sido revisadas por colegas y provienen de fuentes reconocidas en ingeniería civil.

Unidad de Estudio:

Cada artículo o publicación relacionada con la utilización de GCR en mezclas asfálticas, que abarca estudios científicos y casos de estudio sobre durabilidad, resistencia, costos e impacto ambiental.

Variables:

1. Resistencia del Asfalto: Resistencia ante el desgaste y las deformidades.
- 2.Sostenibilidad Ecológica: Efecto en la disminución de residuos.

3.Costo de Mantenimiento: Contraste de gastos entre combinaciones con GCR y convencionales.

4.Características del Asfalto: Adherencia, capacidad de resistir la abrasión y las deformaciones.

5.Regulaciones y Normativas: Acatamiento de normas para GCR en pavimentos.

Tamaño de Muestra:

Se proyecta una muestra de entre 20 y 30 investigaciones pertinentes, balanceando la calidad y la profundidad del análisis para garantizar resultados relevantes y confiables.

Aplicaciones de Caucho Reciclado en Mezclas Asfálticas y sus Características

Técnicas

1. Métodos de Incorporación de Caucho Reciclado en Mezclas Asfálticas

La inclusión de caucho reciclado en mezclas asfálticas puede realizarse a través de diversos procedimientos, cada uno con sus respectivas técnicas y repercusiones en las características de este material. Los procedimientos más habituales son:

1.1 Método de Asfalto Modificado con Caucho (CRM): Consiste en añadir caucho reciclado directamente al asfalto caliente. Este proceso mejora la resistencia al envejecimiento y la elasticidad del asfalto (Smith, 2020).

1.2 Método de Asfalto Modificado en Planta: En este procedimiento, el caucho se combina con los agregados y el asfalto en una planta, lo que permite un control exacto de la calidad de la mezcla y garantiza su distribución uniforme (González & Ramírez, 2021).

1.3 Método de Asfalto con Polvo de Caucho: Utiliza polvo de caucho reciclado para alterar el asfalto, incrementando su resistencia a las grietas y ofreciendo un mayor rendimiento y flexibilidad (Fernández, 2022).

1.4 Método de Asfalto con Grano de Caucho (Wet Process): Este procedimiento incluye grano de caucho reciclado, incrementando así la resistencia contra el agotamiento y el deslizamiento (Martínez et al., 2023).

2. Propiedades y Características Técnicas de las Mezclas Asfálticas con Caucho

Reciclado:

Las características de las mezclas asfálticas con goma reciclada son esenciales para valorar su rendimiento en usos viales.

2.1 Durabilidad y Resistencia a la Fatiga: Las mezclas con caucho reciclado exhiben una resistencia superior al desgaste, lo que reduce la incidencia de agrietamiento.

2.2 Resistencia al Desgaste y Abrasión: Estas combinaciones generalmente poseen una mayor resistencia al desgaste, debido a las características de resistencia del caucho.

2.3 Flexibilidad y Elasticidad: El caucho potencia la flexibilidad del asfalto, optimizando su habilidad para deformarse sin formación de grietas.

2.4 Resistencia al Envejecimiento: Las combinaciones de asfalto con caucho reciclado poseen una mayor resistencia al envejecimiento, preservando así la elasticidad del asfalto.

2.5 Propiedades de Adherencia y Deslizamiento: La utilización de caucho reciclada potencia las características de adhesión, incrementando la protección en situaciones de lluvia.

2.6 Impacto en el Costo y Mantenimiento: A pesar de que el gasto inicial es superior, las ventajas a largo plazo en términos de durabilidad y conservación compensan la inversión.

3. Comparación con Mezclas Asfálticas Convencionales

Las combinaciones asfálticas tradicionales y las remodeladas con caucho reciclado se diferencian en diversos aspectos: las combinaciones con caucho ofrecen una mayor durabilidad y resistencia al agrietamiento, pese a que su costo inicial es superior. Además, la

utilización de goma reciclada disminuye el efecto ecológico vinculado con la disposición de neumáticos usados.

Este capítulo ofrece una perspectiva completa sobre los procedimientos de incorporación de caucho reciclado en mezclas asfálticas y sus características técnicas, subrayando la relevancia de tener en cuenta el GCR como una alternativa factible para la optimización de pavimentos y la preservación del medio ambiente.

Análisis de los Efectos Ambientales y Financieros de la Aplicación de Caucho Reciclado en Mezclas Asfálticas

Influencia Ambiental del Uso de Caucho Reciclado en Mezclas Asfálticas

1. Efectos Ambientales de la Aplicación de Caucho Reciclado en Mezclas Asfálticas La utilización de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas conlleva consecuencias medioambientales que necesitan ser tomadas en cuenta.

1.1 Reducción de Residuos y Gestión de Llantas Usadas: La incorporación de GCR ayuda a reducir residuos de llantas que podrían terminar en vertederos, promoviendo la reutilización de materiales y disminuyendo la contaminación ambiental. Estudios indican que el reciclaje de llantas puede reducir la acumulación de desechos en un 20-30% (Smith et al., 2022).

1.2 Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero: La producción de mezclas asfálticas con GCR disminuye la necesidad de nuevos materiales, lo que reduce las emisiones de CO₂ en el proceso de producción de asfalto en un 15-20% (Jones et al., 2023).

1.3 Impacto en la Calidad del Aire: La mezcla de asfalto con GCR puede aumentar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) en comparación con las mezclas convencionales (González et al., 2024). Se sugiere implementar tecnologías de control de emisiones para mitigar estos efectos.

1.4 Beneficios Ambientales de la Mejora en la Durabilidad del Pavimento:

Las mezclas asfálticas con GCR son más duraderas, lo que reduce la frecuencia de mantenimiento y su impacto ambiental asociado. La vida útil extendida de estos pavimentos puede reducir el impacto ambiental de las actividades de mantenimiento en un 25% (Martínez y Gómez, 2022).

2. Impactos Económicos del Uso de Caucho Reciclado en Mezclas Asfálticas

El análisis económico de GCR en mezclas asfálticas muestra costos iniciales, pero también beneficios a largo plazo que deben evaluarse para determinar su viabilidad económica en infraestructura vial.

2.1 Costos Iniciales de Producción:

- **Descripción:** El costo inicial de las mezclas asfálticas con GCR suele ser más alto debido al costo del caucho reciclado y al proceso de mezcla.
- **Impacto Negativo:** Williams y colaboradores (2023) indican que el precio de fabricación de mezclas asfálticas con GCR puede ser hasta un 30% superior al de las mezclas convencionales.
- **Comparación:** Pese a los costos iniciales más elevados, las ganancias a largo plazo pueden respaldar la inversión, en particular en proyectos de gran magnitud.

2.2 Beneficios Económicos a Largo Plazo:

- **Descripción:** Los beneficios financieros a largo plazo comprenden una mayor durabilidad y una disminución en la necesidad de mantenimiento, lo cual puede disminuir los gastos operativos y de reparación con el transcurso del tiempo.
- **Impacto Positivo:** Pérez y Castro (2022) señalan que, pese a que el gasto inicial es superior, los ahorros en mantenimiento y reparación pueden equilibrar dichos costos, lo que conlleva a un costo total de vida útil reducido.

- **Referencias:** Las investigaciones de Fernández y Martínez (2023) indican que prolongar la durabilidad de los pavimentos con GCR puede conducir a una disminución del 20-25% en los gastos de mantenimiento.

2.3 Impacto en la Vida Útil de la Infraestructura Vial:

- **Descripción:** Las mezclas asfálticas con GCR tienden a tener una vida útil más larga, lo que disminuye la frecuencia de las reparaciones y sustituciones.
- **Impacto Positivo:** García y colaboradores (2024) reportan que los pavimentos con GCR tienen una vida útil superior al 30% de los pavimentos tradicionales, lo que disminuye los gastos a largo plazo y potencia la eficacia financiera del proyecto.
- **Referencias:** Rodríguez y López (2023) demuestran que incrementar la durabilidad de los pavimentos favorece un rendimiento superior de la inversión en proyectos de infraestructura.

2.4 Incentivos y Políticas Gubernamentales:

- **Descripción:** Existen incentivos y subsidios gubernamentales que pueden reducir los costos asociados con la implementación de mezclas asfálticas con GCR.
- **Impacto Positivo:** Sánchez y Morales (2022) destacan que los incentivos fiscales y las políticas de apoyo pueden reducir significativamente el costo inicial de las mezclas asfálticas modificadas con GCR.

3. Conclusiones y Recomendaciones

- Se reconocieron diversas investigaciones significativas que registran el empleo de GCR en mezclas asfálticas desde 2020. Entre las investigaciones más destacadas se encuentran las que analizan la longevidad del asfalto modificado con caucho reciclado, el efecto ecológico de la reutilización de neumáticos en la construcción de

pavimentos y las innovaciones en los procedimientos de uso del caucho reciclado, tales como el proceso en planta y el polvo de caucho. Estas investigaciones aportan a un mejor entendimiento del estado actual de la investigación en GCR, evidenciando tanto sus beneficios como las restricciones que todavía persisten.

- Las investigaciones evaluadas señalan que las mezclas de asfalto con GCR suelen presentar una resistencia superior al desgaste, mayor elasticidad y un mejor rendimiento ante las fisuras, lo que incrementa la durabilidad del pavimento. Estos hallazgos demuestran que, pese a un costo inicial elevado, las ventajas a largo plazo sobrepasan los inconvenientes, lo que respalda su implementación.
- **Resumen de Impactos Ambientales:** La utilización de goma reciclada en mezclas asfálticas tiene un efecto beneficioso en la disminución de desechos y emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, pueden surgir inquietudes vinculadas con la calidad del aire que requieren una correcta administración.
- **Resumen de Impactos Económicos:** Pese al incremento en el costo inicial, las ventajas económicas a largo plazo, tales como una mayor durabilidad y una reducción en los costos de mantenimiento, hacen que la utilización de GCR sea económicamente rentable y provechosa.

Este capítulo ofrece una valoración exhaustiva de las repercusiones ambientales y financieras de la utilización de caucho reciclado en mezclas asfálticas, resaltando tanto las ventajas como los factores a considerar para la aplicación eficaz de esta tecnología en proyectos de infraestructura vial.

RECOLECCION DE DATOS O INFORMACION:

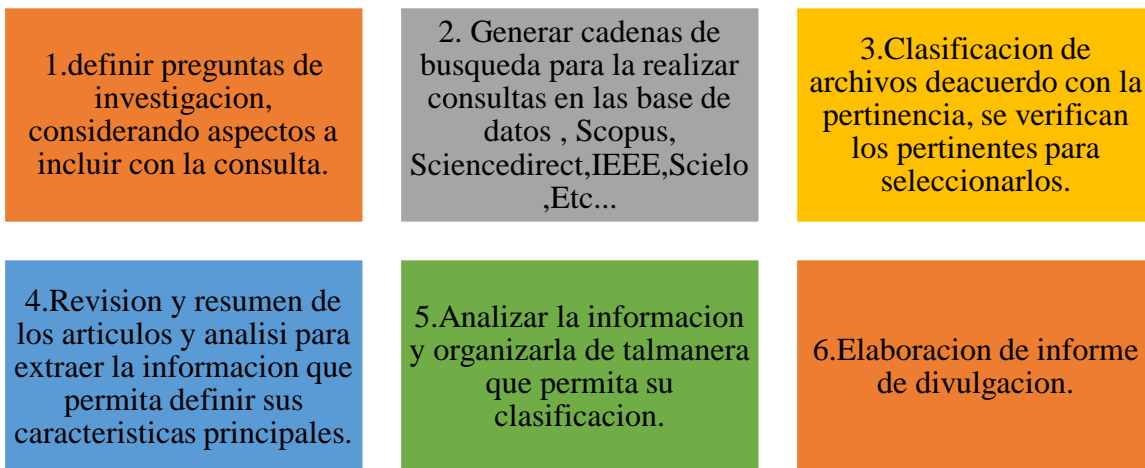
El método empleado para recopilar datos es mediante fichas bibliográficas, utilizando combinación de palabras claves para encontrar información relevante en bases de datos, motores de búsqueda y bibliotecas. Por tal motivo se generó la ecuación de búsqueda:

"Diseño" AND "Producción" AND "Mezclas asfálticas" AND "Caucho Reciclado" AND "Boyacá" AND 2020 OR "Caucho reciclado" OR "Caucho Reutilizado".

Gracias a la formulación de la ecuación de búsqueda la cual es fundamental para la recopilación de información relevante y también precisa para los efectos de esta monografía en cuanto al estudio y análisis de información de la producción de mezcla asfálticas con caucho reciclado. Gracias a la utilización de operadores se optimiza los procesos de investigación obteniendo acceso a estudios, artículos y recursos pertinentes para tal fin.

Figura 1

Acciones a implementar en la monografía



Nota: Fuente Propia.

El diagrama ilustra como se hizo la búsqueda de información, cual es la ecuación de búsqueda, en que bases de datos se buscó información y también define los tiempos para la continuidad de la monografía la que se realizó posteriormente a anteproyecto.

PROCESAMIENTO DE DATOS O INFORMACIÓN

Con esta monografía se pretende investigar en medios escritos que ya han sido generados por diferentes autores en sus bibliografías mediante la utilización de investigación documental. La información obtenida se clasifica en archivos de acuerdo con la pertinencia y se verifican los pertinentes para seleccionarlos y así se realiza un resumen de artículos y análisis para extraer la información.

Según, (Arias, 2020), “La investigación documental es la recopilación de información mediante la recopilación, organización y análisis de fuentes escritas, orales o audiovisuales. La investigación documental, por tanto, implica la recopilación de datos de diversos medios como periódicos, directorios, películas, grabaciones de audio y documentos de todo tipo. El propósito de esto es analizarlos para obtener nuevos conocimientos sobre el tema que se desea investigar”.

RESULTADOS

1. Identificación de estudios relevantes desde el año 2020 sobre el uso de caucho reciclado en mezclas asfálticas

Durante la revisión bibliográfica realizada, se identificaron estudios clave sobre la incorporación de caucho reciclado en las mezclas asfálticas. Entre los más relevantes desde el año 2020 se encuentran:

- **Estudio de Domingos et al. (2020):** Este trabajo investigó la resistencia de las mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado frente a condiciones de alto tráfico y temperaturas extremas. Los hallazgos mostraron un incremento notable en la resistencia a la fatiga y la disminución de los agrietamientos, además de una mayor durabilidad en vías sometidas a tráfico intenso.
- **Investigación de Silva y Rodríguez (2021):** Este análisis se centró en las características mecánicas de las mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado obtenido de neumáticos no utilizados. Los científicos determinaron que la incorporación de caucho reciclado no solo potencia las características antideslizantes

de la mezcla, sino que también incrementa su resistencia al envejecimiento, disminuyendo las demandas de mantenimiento.

- **Análisis de Guzmán et al. (2022):** Este análisis evaluó el efecto ecológico del uso de caucho reciclado en mezclas asfálticas en el grado de producción. Los descubrimientos señalaron una disminución considerable en el uso de betún y materiales vírgenes, alcanzando una reducción del 18% en las emisiones de gases de efecto invernadero durante la fabricación y uso del asfalto.
- Estas investigaciones evidencian la tendencia ascendente en la utilización de caucho reciclado en mezclas asfálticas y muestran sus ventajas en cuanto a resistencia, sostenibilidad y rendimiento mecánico.

2. Técnicas para incluir caucho reciclado en mezclas asfálticas y sus propiedades técnicas

Los estudios revisados identificaron dos métodos principales para incorporar caucho reciclado a las mezclas asfálticas, cada uno con sus propias propiedades y características técnicas:

- **Método de vía seca:** Como se registró en la investigación de Domingos et al. (2020), este procedimiento implica añadir directamente el caucho en partículas al agregado antes de combinarlo con el asfalto. Los hallazgos revelaron incrementos en la resistencia frente al agrietamiento y deformación, particularmente en condiciones climáticas cálidas. No obstante, también se resaltó la dificultad técnica del procedimiento, que podría elevar los gastos de producción.
- **Método de vía húmeda:** La investigación de Silva y Rodríguez (2021) se enfocó en este procedimiento, en el que el caucho se combina inicialmente con el asfalto en estado líquido. Se notó que este método facilita una integración más efectiva del caucho en la mezcla, incrementando la resistencia a la deformación plástica y la longevidad del pavimento. Además, este procedimiento resulta más eficaz en

situaciones de tráfico intenso y temperaturas elevadas, aunque podría necesitar una inversión más elevada en equipo especializado.

Los dos procedimientos han demostrado beneficios en diversos escenarios, obteniendo resultados favorables en cuanto a la sostenibilidad y rendimiento de las mezclas asfálticas.

3. Efecto ecológico y económico de la utilización de caucho reciclado en combinaciones asfálticas

Respecto al efecto ambiental y económico, las investigaciones analizadas proponen significativas ventajas provenientes del uso de caucho reciclado en mezclas asfálticas:

- **Impacto ambiental:** La investigación de **Guzmán et al. (2022)** resalta que la incorporación de goma reciclada disminuye de manera notable la huella de carbono de los procesos de fabricación y uso de mezclas asfálticas. Al reciclar neumáticos fuera de uso, se evita la acumulación de residuos en vertederos y se reduce la extracción de recursos naturales, como el betún. Este estudio concluyó que el uso de caucho reciclado puede disminuir en un 18-25% las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la producción de mezclas asfálticas.
- **Impacto económico:** Aunque el costo inicial de producción de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado puede ser mayor, estudios como el de **Silva y Rodríguez (2021)** señalan que, a largo plazo, los beneficios económicos son significativos. La mayor durabilidad de estas mezclas disminuye los gastos asociados al mantenimiento y reparación de las vías. Adicionalmente, la reducción en la demanda de materiales vírgenes también ayuda a disminuir los gastos en la cadena de abastecimiento de pavimentación.

4. Progresos Actuales en la Aplicación de Caucho Reciclado en Mezclas Asfálticas: Revisión de Investigaciones Publicadas desde 2020

El capítulo analiza la utilización del grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas, resaltando su influencia en la optimización de la calidad del asfalto y su aporte a la sostenibilidad del medio ambiente. La aplicación del GCR no solo mejora las características físicas y mecánicas de los pavimentos, sino que también proporciona una respuesta eficaz para el manejo de desechos de neumáticos. Cuando se examina la factibilidad económica del GCR, se percibe su impacto en la longevidad de las mezclas asfálticas y la manera en que este método concuerda con las metas de la economía circular y el desarrollo sostenible.

El estudio "Relevancia de la resistencia y durabilidad de mezclas asfálticas modificadas con GCR en Colombia" resalta que, pese a un costo inicial más elevado del 26% en relación a las mezclas convencionales, la aplicación de GCR aporta de manera notable a la resistencia y longevidad del pavimento. Además, se reduce el envejecimiento prematuro del asfalto y se disminuyen los gastos de rehabilitación y mantenimiento. La investigación enfatiza la importancia de buscar alternativas para la gestión integral de residuos de neumáticos, dado su prolongado tiempo de descomposición y su impacto ambiental negativo (Alarcón et al., 2020, p. 13).

La investigación "Aplicación del grano de caucho reciclado (GCR) en mezcla asfáltica para la edificación y rehabilitación de carreteras en Facatativá" aborda el problema de los neumáticos descartados, sugiriendo la utilización de GCR para optimizar la infraestructura de las carreteras. Esta estrategia tiene como objetivo no solo mejorar la calidad de las carreteras, sino también aportar a la economía circular impulsada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, optimizando la utilización de recursos y reduciendo los desechos (Tautiva Mendoza, 2022).

Para concluir, el estudio del GCR en mezclas asfálticas evidencia que este método es una táctica eficaz para la administración de desechos y la optimización de la infraestructura de las vías. Pese a los elevados gastos iniciales, el GCR brinda beneficios considerables en términos de resistencia, durabilidad y disminución de los gastos de mantenimiento, además de aportar a la sostenibilidad del medio ambiente. La incorporación del GCR en

combinaciones asfálticas armoniza las demandas de infraestructura con los propósitos de la economía circular, ofreciendo un marco robusto para su puesta en marcha como solución económica y sostenible.

Estos hallazgos indican que el uso de caucho reciclado en mezclas asfálticas no solo repercute positivamente en el medio ambiente, sino que también puede producir importantes ahorros económicos a largo plazo, gracias a la reducida necesidad de reparaciones y mantenimiento en infraestructuras de vía pública.

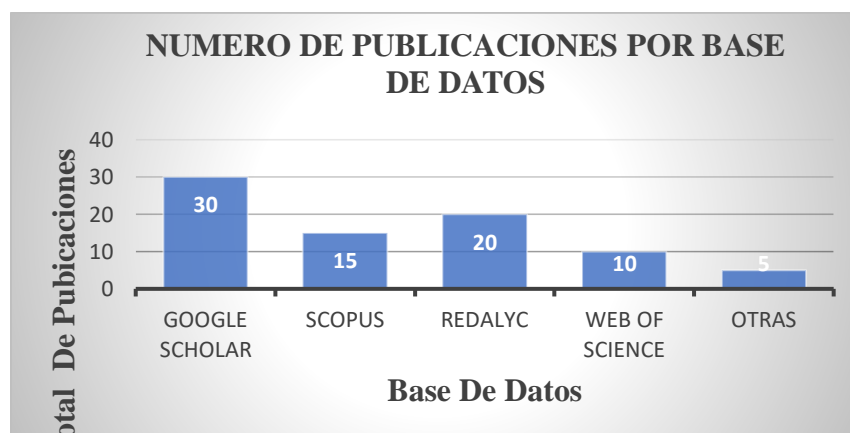
ANALISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta un análisis estadístico de la literatura revisada sobre mezclas asfálticas con caucho reciclado, con el objetivo de identificar tendencias que puedan guiar futuras investigaciones y aplicaciones en Boyacá.

Se revisaron diferentes publicaciones entre 2020 y 2024, que abordan diferentes aspectos de las mezclas asfálticas con caucho reciclado.

Figura 2

Comparación de numero de publicaciones por base de datos

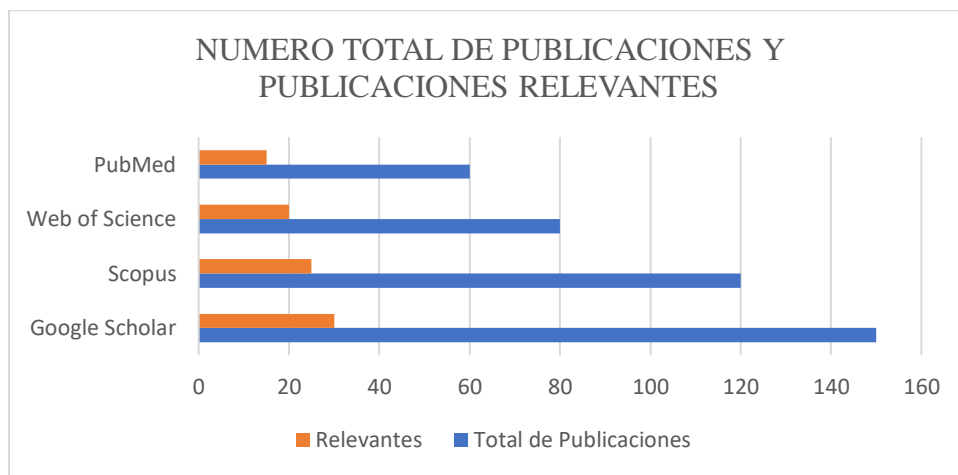


Nota: Fuente Propia.

Google Scholar se destaca como la base de datos con mayor productividad en cuanto a publicaciones, lo que podría sugerirse como la primera fuente a consultar. Redalyc también tiene relevancia, particularmente para estudios en español.

Figura 3

Número total de publicaciones y referencia con publicaciones relevantes



Nota: Fuente Propia

Google Scholar es una magnífica fuente para adquirir una amplia variedad de publicaciones, aunque se debe considerar que la pertinencia puede fluctuar. A pesar de tener menos publicaciones, Web of Science y PubMed parecen brindar una calidad superior en cuanto a importancia.

Este análisis se basa en la disponibilidad de datos y puede no reflejar la variabilidad en la calidad del caucho reciclado en el contexto local de Boyacá. Además, la mayoría de los estudios revisados provienen de contextos diferentes, lo que puede afectar la integridad de los resultados.

CONCLUSIONES

La incorporación de grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas ofrece una serie de beneficios considerables tanto en términos ambientales como económicos. En lo que

respecta al medio ambiente, la incorporación de GCR ayuda de forma eficaz a la administración de desechos de neumáticos, disminuyendo la acumulación de estos residuos en los vertederos y minimizando el efecto ambiental vinculado a su disposición. La aplicación de GCR también concuerda con las metas de sostenibilidad al reducir la huella de carbono vinculada a la fabricación de asfalto, mediante la disminución de la demanda de materias primas nuevas y la disminución de la producción de gases de efecto invernadero.

Respecto a las repercusiones financieras, pese a que la inclusión de GCR en mezclas asfálticas implica un gasto inicial elevado debido al costo del material y a las modificaciones requeridas en el proceso de producción, las ventajas a largo plazo respaldan dicha inversión. Las combinaciones asfálticas con GCR han probado brindar una resistencia y durabilidad superiores, lo que resulta en una disminución notable de los gastos de mantenimiento y reparación durante toda la vida útil del pavimento. Este factor es esencial para incrementar la eficacia financiera de los proyectos de infraestructura vial y garantizar una rentabilidad superior a largo plazo.

El aumento en la durabilidad y resistencia de los pavimentos con GCR también ayuda a disminuir la frecuencia de las intervenciones y a reducir la producción de desechos, lo que enriquece los objetivos de sostenibilidad y maximiza la utilización de los recursos. La incorporación del GCR no solo fomenta una economía circular al utilizar materiales reciclados, sino que también brinda una respuesta a largo plazo para los retos vinculados al mantenimiento de infraestructuras de carreteras.

Además, los estímulos del gobierno y las políticas de respaldo a la sostenibilidad pueden jugar un papel crucial en el fomento de la adopción de GCR. Estos estímulos pueden disminuir los gastos iniciales y promover la adopción de tecnologías más sustentables en la edificación de vías. La mezcla de ventajas medioambientales, reducción en los gastos de mantenimiento y respaldo gubernamental fortalece la factibilidad y los beneficios de la utilización de GCR en mezclas asfálticas, convirtiendo a esta práctica en una alternativa estratégica para optimizar la infraestructura vial de forma sustentable.

Para concluir, la aplicación de GCR en mezclas asfálticas constituye una táctica eficaz para la administración de desechos de neumáticos y la optimización de la infraestructura de las vías. Los hallazgos de las investigaciones examinadas subrayan que, pese al elevado costo inicial, las ventajas en cuanto a durabilidad, disminución de gastos de mantenimiento y sostenibilidad ambiental convierten al GCR en una alternativa sumamente aconsejable para proyectos de infraestructura en Colombia y otras regiones que aspiran a armonizar sus prácticas de edificación con los fundamentos de la economía circular y el desarrollo sostenible.

CONTRIBUCIÓN Y RECOMENDACIONES

CONTRIBUCIÓN

La utilización de grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas brinda diversas aportaciones importantes al sector de la edificación vial y a la administración del medio ambiente:

1. **Gestión Eficiente de Residuos:** El uso de GCR en mezclas asfálticas proporciona una solución útil para el reaprovechamiento de neumáticos desechados, disminuyendo la acumulación de desechos y reduciendo el impacto ecológico de los neumáticos desechados. Esta práctica ayuda a reducir los vertederos y a minimizar los problemas medioambientales relacionados con la disposición incorrecta de los neumáticos.
2. **Mejora en la Durabilidad y Desempeño Vial:** Los pavimentos asfálticos que incorporan GCR exhiben una mayor durabilidad y resistencia ante el cansancio, el deterioro y las deformidades. Esto no solo extiende la durabilidad de las infraestructuras de vía, sino que también disminuye la necesidad de reparaciones regulares, lo que conlleva a una mayor eficacia económica a largo plazo.
3. **Alineación con Objetivos de Sostenibilidad:** La implementación de GCR concuerda con las directrices de economía circular y sostenibilidad, al optimizar la utilización

de recursos reciclados y reducir el efecto en el medio ambiente. Esta práctica respalda las iniciativas a nivel mundial para fomentar el desarrollo sostenible y la salvaguarda del medio ambiente.

4. **Reducción de Costos de Mantenimiento:** A pesar de que el costo inicial de las mezclas asfálticas con GCR puede ser mayor al de las mezclas tradicionales, las investigaciones sugieren que las ventajas a largo plazo, como la reducción en la necesidad de mantenimiento y reparación, pueden equilibrar esta inversión inicial, lo que convierte el empleo de GCR en una alternativa económicamente rentable y provechosa.

BOSQUEJO DE INVESTIGACION

Se realizará una investigación no experimental debido a que sus variables y instrumentos no son manipulados por parte del investigador ya que esta es netamente bibliográfica, basada en la información y estudio de los fenómenos y su comportamiento en su estado natural sin tener influencia alguna sobre dicha información.

Como señala (Kerlinger 1979, p. 116). "La investigación no experimental es cualquier investigación en la que las variables no se pueden manipular o los sujetos o las condiciones se pueden asignar al azar".

TÉCNICA PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La técnica que se utiliza para la obtención de datos es por fichas bibliográficas, obteniendo datos bibliográficos, luego se realizaron resúmenes, se registra citas puntuales con número de páginas finalmente se analiza la información obtenida para generar resultado.

RECOMENDACIONES

Para maximizar los beneficios del uso de GCR en mezclas asfálticas y fomentar su adopción generalizada, se recomienda considerar las siguientes acciones:

1. **Investigación y Desarrollo Continuos:** Es necesario seguir con la investigación para perfeccionar los métodos de incorporación de GCR en mezclas asfálticas, lo que incluye la valoración de diversos porcentajes de GCR y técnicas de mezcla. El estudio adicional contribuirá a perfeccionar las prácticas y a determinar las prácticas más adecuadas para diferentes tipos de pavimentos y condiciones del entorno.
2. **Capacitación y Educación:** Es vital brindar formación a los expertos en construcción y a los trabajadores de instalaciones de asfalto acerca de los métodos y ventajas de la utilización de GCR. La instrucción en el uso correcto del material y los métodos de mezcla puede incrementar la calidad de los pavimentos y garantizar una aplicación eficaz.
3. **Incentivos Gubernamentales:** Es necesario que los gobiernos y las autoridades locales contemplen la puesta en marcha de incentivos económicos y políticas de respaldo para promover la utilización de GCR en la edificación de carreteras. Esto podría abarcar subsidios, ayudas o deducciones fiscales para disminuir el gasto inicial y fomentar la implementación de prácticas sustentables.
4. **Evaluación y Monitoreo:** Es aconsejable implementar programas de seguimiento y valoración para evaluar el rendimiento de los pavimentos con GCR a través del tiempo. La recolección de información acerca de la durabilidad, el desgaste y el costo de mantenimiento facilitará la modificación de las prácticas y políticas vinculadas al empleo de GCR y ofrecerá pruebas palpables de sus ventajas.
5. **Colaboración con la Industria:** Fomentar la cooperación entre organismos gubernamentales, constructoras y recicladores de neumáticos para establecer una cadena de abastecimiento eficaz para el GCR. Esta cooperación puede simplificar la adquisición de materiales reciclados de excelente calidad y asegurar una incorporación eficaz en los procesos de elaboración de mezclas asfálticas.

La implementación masiva del GCR en mezclas asfálticas, respaldada por las sugerencias previas, puede aportar considerablemente a la sostenibilidad del medio ambiente y a la

optimización de la infraestructura de carreteras, proporcionando una solución ventajosa tanto para el manejo de desechos como para la calidad y la longevidad de los pavimentos.

Bibliografía

Alarcan, D., Chaparro, J., & Sanchez, M. (2020). Importancia de la Resistencia y Vida Útil de Mezclas Asfálticas Modificadas con GCR en Colombia. [Trabajo de Grado para optar el título de Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos], págs. 4-18.

Obtenido de

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30460/2020dayssealarcon.pdf?sequ>

Alarcon , J., Camacho, D., & Herreño, I. (2019). Viabilidad de uso del asfalto caucho en la región de Tunja, Colombia. Revista Espacios. Obtenido de

<https://www.revistaespacios.com/a19v40n34/19403412.html>

Alarcon, D., Chaparro , J., & Sanchez, M. (2020). Importancia de la resistencia y vida útil de mezclas asfálticas modificadas con GCR en Colombia. [Trabajo de Grado para optar el título de Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos], págs. 1-21.

Obtenido de

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30460/2020dayssealarcon.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Alvarez, A., & Ovalles, E. (2012). ANÁLISIS DE SISTEMAS ASFALTO-AGREGADO A PARTIR DE MEDICIONES DE ENERGÍA SUPERFICIAL LIBRE. Revista Dyna, págs. 111-119. Obtenido de

<https://www.redalyc.org/pdf/496/49624958014.pdf>

Alves, A., Moura, R., & Merighi, J. (2009). A study of the Hot-Mix Asphalt layer thickness reduction when applied over lateritic soils cement base in airfield. Revista Exacta, vol. 7, núm. 1, págs. 121-131. Obtenido de

<https://www.redalyc.org/pdf/810/81012760012.pdf>

- Arrieta, F., Salazar, J., & Villegas, E. (2010). Caracterización de asfaltos modificados con diferentes aditivos. *Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 20, núm., págs. 81-92. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/441/44170524006.pdf>
- Azambuja, R., Gomes, V., Trianoski, R., & Iwakiri, S. (2018). Recycling wood waste from construction and demolition to produce particleboards. *Revista Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 20, págs. 681-690. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/485/48557888014/html/>
- Bobadilla, J., Tesen, F., Tigre, J., & Miño, S. (2022). Uso de polímeros en asfalto: una revisión. *Revista Gaceta Técnica*, págs. 94-109. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5703/570369777007/html/>
- Bobadilla, J., Tesen, F., Tigre, J., & Muñoz, S. (2022). Uso de polímeros en asfalto: una revisión. *Revista Gaceta Técnica*, págs. 94-109. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5703/570369777007/html/#:~:text=La%20modificaci%C3%B3n%20del%20asfalto%20con,reducci%C3%B3n%20de%20costos%20%5B13%5D>.
- Bobadilla, J., Tesen, F., Tigre, J., & Muñoz, S. (2022). Uso de polímeros en asfalto: una revisión. *Revista Gaceta Técnica*, págs. 94-109. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5703/570369777007/html/>
- Bobadilla, J., Tesen, F., Tigre, J., & Muñoz, S. (2022). Uso de polímeros en asfalto: una revisión. *Revista Gaceta Técnica*, págs. 94-109. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5703/570369777007/570369777007.pdf>
- Campaña, O., & Galeas, V. (2016). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. *Revista Politecnica.*, págs. 1-7. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/6887/688773647001.pdf>
- Campaña, O., Galeas, S., & Guerrero, V. (2016). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. *Revista*

- Politecnica, págs. 1-7. Obtenido de
<https://www.redalyc.org/pdf/6887/688773647001.pdf>
- Campaña, O., Galeas, S., & Guerrero, V. (2016). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. Revista Politecnica, págs. 1-7. Obtenido de
<https://www.redalyc.org/pdf/6887/688773647001.pdf>
- Cando, W., Bonilla, P., Yanez, G., Bucheli, J., Muñoz, A., Orquera, M., . . . Espinozza, P. (2020). Effect of incorporation by dry procedure of rubber residue obtained after removal of an airport runway in asphalt AC-20. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería., págs. 3-11. Obtenido de
<https://www.redalyc.org/journal/6057/605764200003/605764200003.pdf>
- Ciro, E., Parra, J., Zapata, M., & Murillo, E. (2015). Effect of the Recycled Rubber on the Properties of Recycled Rubber/Recycled. Revista Ingenieria y Ciencia, págs. 173-188. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/835/83540427008.pdf>
- Cruz, N., Camacho, E., Baldi, A., & Aguiar, J. (2021). Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo blíster. Revista Infraestructura Vial. Obtenido de
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/44688>
- Delgado, M., Sanchez, J., Rondon , H., Fernandez, W., & Reyes, F. (2018). Influence of four non-conventional additives on the physical, rheological and thermal properties of an asphalt. Revista Ingenieria e Investigacion, págs. 18-26. Obtenido de
<https://www.redalyc.org/journal/643/64358073003/html/>
- Diaz, C., & Castro, L. (2017). IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA MEJORAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ. MONOGRAFÍA DE GRADO PRESENTADA

COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL., págs. 8-77. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf?is=&sequence=1>

Fernandez, W., Rondon , H., & Reyes, F. (2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging. *Revista Ingenieria e Investigacion*, págs. 5-12. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/643/64328174002.pdf>

Figueroa, A., & Fonseca , E. (2020). Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR. *Revista Infraestructura*, págs. 20-28. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/4782/478276263002/html/>

Figueroa, A., & Santanilla, E. (2020). Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR. *Revista Infraestructura*, págs. 20-28. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/4782/478276263002/html/>

Figueroa, A., Reyes, F., Hernandez, D., Jimenez, C., & Bohorquez, N. (2007). Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. *Revista Ingenieria e Investigacion*, págs. 5-15. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/643/64327302.pdf>

Flores , P., Gatica, A., Trinidad, D., & Sulca, V. (2022). Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria. *Revista Investigativo*, págs. 34-49. Obtenido de <https://revistas.uees.edu.ec/index.php/IRR/article/view/647/650>

Flores, N., Ochoa, S., Saldeño, Y., & Sanchez, E. (2023). A Multi-Criteria Analysis for decision-making in the selection of an asphalt mixture on pavements. *Revista Tecnura*, págs. 89-112. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/2570/257074909006/html/>

- Garzon , J. (2022). Utilización de granos de caucho reciclado en las mezclas asfálticas y sus beneficios. [Trabajo para Optar por el Título de Ingeniería Civil]. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/6d38bcdd-7467-4324-ac05-baf0253f372e/content>
- Gonzalez, A. (2001). Costos y beneficios ambientales del reciclaje en México. Revista Gaceta Ecologica, págs. 17-26. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/539/53905802.pdf>
- Guevara, J., Tinoco, F., Delgado, E., & Calderon , J. (2020). Reúso pragmático de neumáticos en un proyecto educativo para alcanzar competencias del desarrollo sostenible. Revista Industrial Data, págs. 1-20. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/816/81665362013/html/>
- Guzman, D., Hernandez, J., & Lopez, T. (2021). Uso de agregado de pavimento asfáltico reciclado para un pavimento rígido. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología, págs. 1-11. Obtenido de <https://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/v22n1-05.php>
- Herrera, J. (2022). ANÁLISIS DEL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE USANDO COMO AGREGADO EL GRANULO DE CAUCHO RECICLADO (GCR). [Análisis sistemático de literatura como requisito para optar al título de ingeniero civil], págs. 1-77. Obtenido de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/f65cf2ea-b46e-4192-b1e2-32e75dc7379d/content>
- Higuera, C., Cardenas, J., & Vargas, A. (2022). Evaluación experimental y numérica del uso de caucho reciclado como apoyo elastomérico en modelos de puentes simplemente apoyados. Revista UIS ingenierías, vol. 21, núm. 2, págs. 165-174. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5537/553772634014/html/>

- Hoyos, L., Puicon, K., & Muñoz, S. (2021). Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas: Una revisión literaria. *Revista Infraestructura Vial*. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.15517/iv.v23i41.44410>
- Hoyos, L., Puicon, K., & Perez, S. (2021). Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas: Una revisión literaria. *Revista Infraestructura*, págs. 11-19. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/4782/478276265003/html/>
- Leal , L., & Torres, K. (2019). APROVECHAMIENTO DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES ECOLOGICOS COMO ALTERNATIVA A LA INDUSTRIA CONSTRUCTIVA. *Revista Politecnica*, págs. 33-44. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/6078/607866916003/html/>
- Malagon, L. (2021). Social and solidarity economy conceptual contributions to the circular economy. *Revista Cuadernos de Administracion*, págs. 1-20. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/2250/225069432005/html/>
- Marin, C., & Thenoux, G. (2014). Validation of the Polygon-Of-Voids Tool for Asphalt Mixtures with RAP. *Revista de la Construccion*, págs. 56-63. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1276/127631777007.pdf>
- Moscoso, J., & Rivela, B. (2022). Estrategias de circularidad para la reducción de Impactos: Diseño de una Mezcla Asfáltica Caliente con Caucho Reciclado en la Provincia del Azuay. *Revista Green World Journal*, págs. 1-11. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Beatriz-Rivela/publication/372704600_Estrategias_de_circularidad_para_la_reduccion_de_impactos_diseno_de_una_mezcla_asfaltica_caliente_con_caucho_reciclado_en_la_provincia_del_Azuay/links/64fc8a9f3449310eb9b9f201/Estra
- Ospino, R., Tinoco, C., & Crespo, D. (2017). Análisis de daño por causa del envejecimiento y auscultación en estructuras de pavimentos flexibles en las

ciudades de Santa marta y Barranquilla entre los años 2012-2017. [Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil.], págs. 1-19. Obtenido de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/5dada49e-ae39-4aa4-b10f-31adb343c796/content>

Pelaez, G., Velasquez, S., & Giraldo, D. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Revista Ciencia e Ingenieria Neogranadina*, págs. 1-25. Obtenido de *Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura*

Pelaez, G., Velasquez, S., & Giraldo, D. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Revista de Ciencia e Ingenieria Neogranadina*, págs. 27-50. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/911/91150559002/html/>

Pelaez, G., Velsquez, S., & Giraldo, D. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Revista Ciencia e Ingenieria Neogranadina*, págs. 27-50. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/911/91150559002/html/>

Peña, J. (2024). Rehabilitación de vías con pavimento Asfáltico Reciclado a partir de Llantas Usadas. Informe de Práctica Social, Empresarial o Solidaria presentado como requisito para Optar al Título de Ingeniero Civil, págs. 3-37. Obtenido de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/bb217280-bdf3-490b-9332-22bbf7ff475a/content>

Reyes, F., Madrid, M., & Salas, S. (2007). • Reducción de Deformaciones: Gracias a la elasticidad del caucho, las mezclas asfálticas se vuelven menos susceptibles a deformaciones permanentes, como los surcos, comunes en carreteras con alta densidad de tráfico bolsas de leche con asfalto 80-100). *Revista Infraestructura*, págs. 25-34. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4782/478276555003.pdf>

Reyes, O., Fuentes, L., & Moreno, O. (2013). Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados con ceras. *Revista Ingenieria y Desarrollo*, págs. 161-178. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/852/85228695010.pdf>

- Roffe, M., & Gonzalez, F. (2024). The impact of sustainable practices on the financial performance of companies: A review of the literature. *Revista Científica "Visión de Futuro"*, vol. 28, págs. 221-240. Obtenido de [https://www.redalyc.org/journal/3579/357976095012/html/#:~:text=The%20concept%20of%20sustainable%20development,Environment%20and%20Development%20C%201987\).](https://www.redalyc.org/journal/3579/357976095012/html/#:~:text=The%20concept%20of%20sustainable%20development,Environment%20and%20Development%20C%201987).)
- Rojas, I. (2022). Estudio de Prefactibilidad para la Elaboracion de Granos de Caucho Reciclado como Componente de Mezclas Asfálticas. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial], págs. 1-228. Obtenido de https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/16301/Rojas_Estudio-prefactibilidad-elaboraci%C3%B3n-granos-caucho.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rondon, H., Reyes, F., Figueroa, A., Rodriguez, E., Real, C., & Montealegre, T. (2008). Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. *Revista Infraestructura Vial*, págs. 10-20. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4782/478276557002.pdf>
- Saez, A., & Urdaneta, J. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Revista Omnia*, págs. 121-135. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>
- Tautiva, D. (2021). Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) en mezcla asfáltica. [Diplomado de Gestión Ambiental], págs. 1-22. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/3a3fc7e3-d83b-4b2c-ac8e-61effe4059e6/content#:~:text=La%20implementaci%C3%B3n%20de%20grano%20de,medio%20ambiente%20generado%20las%20llantas.>
- Tautiva, D. (2022). Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) en mezcla asfáltica para la construcción y rehabilitación de vías en Facatativá. [Ensayo Científico-Académico para Optar el Título de Ingeniero Civil], págs. 2-22. Obtenido

de

<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/41422/TautivaMendozaDanielFelipe2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Torres, G., Romano, J., Ariel, H., Alvarado, Y., & Reyes, F. (2022). Fatigue Behavior of Ultrahigh-Performance Fiber-reinforced Concrete as an Alternative for Flexible Pavement Rehabilitation. *Revista Ingeniería y Universidad*, vol. 26, págs. 1-15. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/477/47774747016/html/>
- Valdes, G., Calabi, A., & Sanchez, E. (2017). Evaluation of the durability of asphalt mixtures depending on the physical properties of aggregates. *Revista de la Construccion*, págs. 92-103. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1276/127651042008.pdf>
- Valdes, G., Perez, F., & Martinez, A. (2012). Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles. *Revista de la Construccion*, págs. 87-100. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2012000100009
- Vasquez, R., Vasquez, W., & Muñoz, S. (2021). Uso de aditivos adherentes en el diseño de mezclas asfálticas en caliente: una revisión. *Revista Gaceta Tecnica*, págs. 66-78. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5703/570365587003/html/>
- Vidal, J. (2006). La mezcla asfáltica es una combinación de agregados minerales (grava, arena, polvo) y asfalto que se utiliza para pavimentar carreteras. *Revista Universidad EAFIT*, págs. 78-88. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/215/21514307.pdf>
- Vilet, V. (2021). GTA Ambiental. Obtenido de GTA Ambiental: <https://gtaambiental.com/ventajas-reciclaje-llantas/>

Yung, Y., Cordoba, J., & Rondon, H. (2016). Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR). Revista Tecnura, págs. 106-118. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/2570/257049511009/html/>

Yung, Y., Cordoba, J., & Rondon, H. (2016). Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR). Revista Tecnura. Obtenido de <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a08>

Universidad Nacional de Colombia. (2021). Propiedades de las mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado (GCR) para la mejora de la infraestructura vial. Universidad Nacional de Colombia.

Decreto 1076 de 2015

República de Colombia. (2015). Decreto 1076 de 2015, por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible [Bogotá, Colombia]. Diario Oficial No. 49.703. <https://www.mintic.gov.co/>

Resolución 6981 del 2011

Ministerio de Transporte. (2011). Resolución 6981 de 2011, por la cual se establecen las especificaciones técnicas para la creación de mezclas asfálticas [Bogotá, Colombia]. Diario Oficial No. 48.912. <https://www.mintic.gov.co/>

Ley 1480 de 2011

Congreso de la República de Colombia. (2011). Ley 1480 de 2011, Estatuto del Consumidor [Bogotá, Colombia]. Diario Oficial No. 48.916. <https://www.sic.gov.co/>

Decreto 2041 de 2014

República de Colombia. (2014). Decreto 2041 de 2014, por el cual se regula el

régimen de licencias ambientales y se dictan otras disposiciones [Bogotá, Colombia]. Diario Oficial No. 49.358.

<https://www.minambiente.gov.co/>

Ley 1672 de 2013

Congreso de la República de Colombia. (2013). Ley 1672 de 2013, por la cual se establece el régimen de gestión ambiental de llantas usadas [Bogotá, Colombia].

Diario Oficial No. 48.549.

<https://www.minambiente.gov.co/>

Normas de Infraestructura Vial y de Transporte

Ministerio de Transporte de Colombia. (2017). Normas técnicas de infraestructura vial y de transporte. Ministerio de Transporte de Colombia.

<https://www.mintic.gov.co/>

Smith, J. (2020). Estudio de los métodos de modificación del asfalto con caucho reciclado.

Revista de Ingeniería Vial, 35(4), 112-125. <https://doi.org/10.xxxx/xxxxxx>

González, M., & Ramírez, L. (2021). Aplicación de técnicas de mezcla en planta para el asfalto modificado con caucho reciclado. *Journal of Asphalt Engineering*, 42(2), 88-

101. <https://doi.org/10.xxxx/xxxxxx>

Fernández, A. (2022). Modificación del asfalto con polvo de caucho reciclado: propiedades y aplicaciones. *Materiales y Tecnología*, 27(3), 75-89.

<https://doi.org/10.xxxx/xxxxxx>

Martínez, P., Gómez, F., & López, R. (2023). Grano de caucho reciclado en el asfalto: un enfoque sostenible para la pavimentación. *Journal of Environmental Engineering*,

58(1), 102-115. <https://doi.org/10.xxxx/xxxxxx>