

ANÁLISIS TÉCNICO Y AMBIENTAL DEL USO DE MATERIALES RECICLADOS (RAP,
GCR Y RCD) EN MEZCLAS ASFÁLTICAS SOSTENIBLES EN COLOMBIA



JUAN DAVID GUILLOT FORERO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
VILLAVICENCIO

2025

ANÁLISIS TÉCNICO Y AMBIENTAL DEL USO DE MATERIALES RECICLADOS (RAP,
GCR Y RCD) EN MEZCLAS ASFÁLTICAS SOSTENIBLES EN COLOMBIA

JUAN DAVID GUILLOT FORERO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor

Mg. JUAN MANUEL SALGADO DIAZ

Magíster en Ingeniería civil

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
VILLAVICENCIO

2025

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Adrián Mauricio GARCIA PEÑARANDA, O. P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Ing. Luis Fernando DÍAZ CRUZ

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

Dedico este proyecto a todas las personas que, de una u otra forma, hicieron parte de este proceso. A quienes me brindaron su apoyo, compañía y palabras oportunas en los momentos más difíciles. Cada gesto, por pequeño que haya parecido, fue fundamental para llegar hasta aquí. Este logro también es de ustedes.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y entornos académicos que hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

Agradezco especialmente al ingeniero Juan Manuel Salgado Díaz, quien me acompañó como asesor durante este proceso. Su orientación, compromiso y valiosos aportes fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este proyecto. Extiendo también mi gratitud al ingeniero Luis Fernando Díaz Cruz, decano de la Facultad, por su constante apoyo y por fomentar un espacio académico propicio para la formación profesional. A la Universidad Santo Tomás, por brindarme los conocimientos, herramientas y experiencias que contribuyeron a mi crecimiento personal y académico.

A mi familia, por ser mi soporte incondicional en cada etapa de esta travesía. De manera muy especial, a mi mamá, cuyo amor, fortaleza y sacrificio han sido el motor que me impulsó a seguir adelante aun en los momentos más difíciles. A mis amigos y compañeros, por su compañía, ánimo y amistad sincera a lo largo de esta carrera.

Finalmente, a todos aquellos que, de una u otra forma, contribuyeron a que este objetivo se hiciera realidad. A todos, muchas gracias.

Contenido

	Pág.
1. Resumen	11
2. Abstract	12
3. Glosario	13
4. Introducción.....	14
5. Justificación.....	16
5.1. Justificación técnica	16
5.2. Justificación ambiental.....	16
5.3. Justificación normativa	17
6. Objetivos	19
6.1. Objetivo general:.....	19
6.2. Objetivo específico:	19
7. Estado del arte	20
8. Metodología.....	24
9. Marco técnico	26
9.1. Materiales renovables en pavimentos asfálticos en Colombia	26
9.1.1 Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)	26
9.1.2 Grano de Caucho Reciclado (GCR).....	27
9.1.3 Residuos de Construcción y Demolición (RCD)	27
9.1.4 Otros materiales renovables.....	28
9.2. Parámetros mecánicos.....	29
9.2.1 CBR (California Bearing Ratio):	29
9.2.2 Módulo resiliente (MR):	29
9.2.3 Estabilidad y flujo Marshall:.....	30
9.2.4 Otros ensayos:	30
9.3. Comparación normativa (ASTM, INVÍAS e ICONTEC)	31
9.3.1 Normas ASTM/AASHTO:	31
9.3.2 INVÍAS (Instituto Nacional de Vías):	31
9.3.3 ICONTEC (NTC - Normas Técnicas Colombianas):	32

9.4.	Impacto ambiental de los pavimentos tradicionales en Colombia.....	33
9.5.	Ejemplos de aplicación en Colombia.....	33
9.6.	Limitaciones actuales.....	34
10.	Resultados e impacto	36
10.1.	Resultados técnicos y comparación normativa	36
10.2.	Evaluación ambiental.....	37
10.3.	Impacto económico y social.....	38
10.4.	Síntesis de impacto multicriterio	39
11.	Formas en tablas y figuras	41
11.1.	Identificación de Tablas.....	41
11.2.	Identificación de Figuras.....	42
12.	Conclusiones	44
12.1.	Conclusiones técnicas	44
12.2.	Conclusiones ambientales.....	44
12.3.	Conclusiones normativas	44
12.4.	Conclusiones económicas y sociales	45
13.	Recomendaciones	46
13.1.	Actualización normativa y técnica.....	46
13.2.	Plan piloto de implementación gradual.....	46
13.3.	Fortalecimiento institucional y formación	47
13.4.	Escalabilidad y financiamiento	47
14.	Bibliografía	48

Lista de anexos

Anexo A Módulo dinámico de mezclas SMA-13 con diferentes contenidos de RAP	53
Anexo B. Fichas técnicas de materiales renovables	53
Anexo C Diagrama de proceso de incorporación de materiales renovables.....	54
Anexo D. Cronograma de implementación piloto (18 meses).....	55
Anexo E. Posibles zonas de aplicación (Meta y Orinoquía).....	55
Anexo F. Tabla comparativa técnica de mezclas asfálticas	56

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Matriz comparativa de estudios relevantes sobre materiales renovables en pavimentación.	22
Tabla 2 Desarrollo Metodológico.	25
Tabla 3 Impacto multicriterio.	39
Tabla 4 Resultados del proyecto.	39
Tabla 5 Comportamiento técnico de materiales reciclados.	40
Tabla 6 Indicadores de impacto ambiental.	40
Tabla 7 Comparación de costos y beneficios sociales.	40
Tabla 8 Comparación entre pavimentos verdes y pavimentos reciclados.	41
Tabla 9 Comparativa del Impacto Ambiental de Tipos de Pavimento.	41
Tabla 10 Plan piloto gradual.	46
Tabla 11 Cronograma plan piloto.	55
Tabla 12 Tabla comparativa mezclas asfálticas.	56

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Ciclo de vida de una mezcla asfáltica sostenible.....	29
Figura 2 Principales impactos ambientales de los pavimentos asfálticos convencionales	33
Figura 3 Ubicación de casos piloto de aplicación de materiales reciclados en Colombia.....	34
Figura 4 Relación entre módulo resiliente y esfuerzo de confinamiento para mezclas con RAP y RCA.	37
Figura 5 Evolución del costo acumulado de mantenimiento para pavimentos convencional, reciclado y verde a lo largo de 20 años.	42
Figura 6 Comparación del impacto ambiental entre pavimento convencional y pavimento verde.....	43
Figura 7 Módulo dinámico de mezclas SMA-13 con diferentes contenidos de RAP.	53

1. Resumen

El presente estudio analiza la viabilidad técnica y ambiental del uso de materiales reciclados, tales como pavimento asfáltico recuperado (RAP), grano de caucho reciclado (GCR) y residuos de construcción y demolición (RCD), en mezclas asfálticas sostenibles aplicables al contexto colombiano. A partir de una metodología mixta que integra revisión documental y análisis comparativo multicriterio, se evaluaron propiedades físicas, impactos ambientales y barreras normativas asociadas a estos materiales en proyectos viales.

Los resultados muestran que el uso de RAP y GCR en mezclas asfálticas puede reducir entre un 20 % y un 30 % las emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación con las mezclas convencionales (González, 2022; Figueroa & Fonseca, 2020). Por su parte, la inclusión de RCD puede disminuir hasta en un 40 % la demanda de agregados vírgenes (Pacheco et al., 2017; Ortiz-Díaz & Jurado, 2021), promoviendo el aprovechamiento de residuos y la disminución de impactos por extracción de materiales. A nivel económico, se ha evidenciado un ahorro de costos de producción cercano al 25 % en proyectos piloto, sin comprometer el desempeño mecánico esperado (Reyes et al., 2018).

Se documentaron experiencias locales en ciudades como Bogotá, Medellín y Villavicencio, donde estas mezclas recicladas han mostrado buen comportamiento técnico bajo condiciones reales de tráfico y clima (Valencia & Hernández, 2023; IMANI, 2023). Se concluye que, a pesar de las limitaciones normativas y operativas actuales, el uso de materiales reciclados en mezclas asfálticas representa una estrategia viable y sostenible para el desarrollo de infraestructura vial en Colombia, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y con potencial de implementación a gran escala.

Palabras Clave: Pavimentos sostenibles; Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP); Grano de Caucho Reciclado (GCR); Residuos de Construcción y Demolición (RCD); Infraestructura vial; Impacto ambiental.

2. Abstract

This study analyzes the technical and environmental feasibility of using recycled materials, such as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Ground Tire Rubber (GTR), and Construction and Demolition Waste (CDW), in sustainable asphalt mixtures for the Colombian context. Based on a mixed-methods approach that combines a literature review and a multicriteria comparative analysis, the research evaluated physical properties, environmental impacts, and regulatory barriers associated with these materials in road infrastructure projects (Figueroa & Fonseca, 2020; González, 2022).

The findings indicate that incorporating RAP and GTR into asphalt mixtures can reduce greenhouse gas emissions by approximately 20% to 30% compared to conventional mixtures (González, 2022; Figueroa & Fonseca, 2020). In turn, CDW integration can decrease the demand for virgin aggregates by up to 40%, promoting waste reuse and minimizing extraction-related impacts (Pacheco et al., 2017; Ortiz-Díaz & Jurado, 2021). Economically, pilot projects have shown cost savings of about 25% in asphalt production, without compromising expected mechanical performance (Reyes et al., 2018).

Local case studies in Bogotá, Medellín, and Villavicencio have demonstrated the technical feasibility of implementing these recycled mixtures under real traffic and climate conditions (Figueroa & Fonseca, 2020; Valencia & Hernández, 2023). Despite current regulatory and operational limitations, the adoption of recycled materials in asphalt mixtures represents a viable and sustainable strategy for road infrastructure development in Colombia, aligned with the Sustainable Development Goals and with strong potential for large-scale implementation (Reyes et al., 2018; DNP, 2023).

Keywords: Sustainable pavements, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Ground Tire Rubber (GTR), Construction and Demolition Waste (CDW), Road infrastructure, Environmental impact.

3. Glosario

- **Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP):** Material resultante del fresado de capas asfálticas existentes, que puede ser reutilizado en nuevas mezclas mediante la adición de agentes rejuvenecedores.
- **Residuos de Construcción y Demolición (RCD):** Desechos generados por obras civiles que incluyen concreto, ladrillos, asfalto y tierra, con potencial de ser reciclados para aplicaciones en infraestructura vial.
- **Grano de Caucho Reciclado (GCR):** Partículas trituradas provenientes de neumáticos fuera de uso, utilizadas como modificador en mezclas asfálticas para mejorar la resistencia y la flexibilidad.
- **Emisiones de CO₂:** Gases de efecto invernadero liberados durante procesos industriales como la producción de asfalto y la compactación de mezclas en caliente.
- **Huella de carbono:** Indicador ambiental que cuantifica las emisiones totales de gases de efecto invernadero generadas por una actividad, producto o proceso.
- **Economía circular:** Modelo de producción y consumo que promueve la reutilización, el reciclaje y el aprovechamiento de materiales para minimizar residuos.
- **Infraestructura vial:** Conjunto de elementos físicos que permiten el tránsito vehicular y peatonal, como carreteras, calles, puentes y vías rurales.
- **Pavimento sostenible:** Sistema de pavimentación que busca reducir el impacto ambiental, optimizar el uso de recursos y mejorar la durabilidad estructural.
- **Pavimentos verdes:** Tipos de pavimentos que incorporan materiales reciclados o permeables, con el fin de mejorar la gestión ambiental urbana y la eficiencia hídrica.
- **Materiales reciclados:** Insumos reutilizados que provienen de residuos industriales o postconsumo, como RAP, GCR o RCD, empleados como sustitutos parciales de materias primas vírgenes.
- **Mezcla asfáltica:** Combinación de agregados minerales con un ligante bituminoso, diseñada para conformar capas de pavimento con capacidad de soporte, adherencia y durabilidad.

4. Introducción

En Colombia, el sector de la construcción vial representa una actividad clave para el desarrollo económico y social, pero también una fuente considerable de impacto ambiental. La producción y mantenimiento de pavimentos asfálticos tradicionales implica un alto consumo de recursos no renovables, además de la emisión de gases contaminantes y la generación de residuos que, al no ser gestionados adecuadamente, afectan la calidad del aire, los suelos y los cuerpos de agua. Según el Ministerio de Ambiente (2020), el sector transporte fue responsable de más de 29.000 GgCO₂e en emisiones durante 2018, y los residuos de construcción y demolición (RCD) representan más del 40 % del total de desechos sólidos en ciudades como Bogotá (UAESP, 2021).

Frente a esta problemática, ha surgido el interés por alternativas más sostenibles, entre ellas el uso de materiales reciclados en mezclas asfálticas. Componentes como el pavimento asfáltico recuperado (RAP), el grano de caucho reciclado (GCR) y los RCD han demostrado en investigaciones internacionales que pueden mejorar la eficiencia estructural del pavimento, reducir su huella ambiental y generar ahorros en los costos de producción. En Colombia, iniciativas lideradas por Ecopetrol, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) en Bogotá, y algunas universidades en ciudades como Medellín y Villavicencio han demostrado resultados alentadores. Sin embargo, su implementación a gran escala continúa siendo limitada, debido a barreras normativas, falta de infraestructura para el reciclaje y escasa documentación técnica local sobre su desempeño.

Aunque existen estudios preliminares y experiencias regionales, aún es limitada la documentación técnica que permita evaluar con rigor el comportamiento estructural, el impacto ambiental cuantificado y la viabilidad a largo plazo de estas mezclas recicladas en las condiciones específicas del entorno colombiano. Esta brecha dificulta la toma de decisiones informadas por parte de diseñadores, entidades públicas y empresas del sector vial.

En respuesta a esta problemática, el presente estudio tiene como propósito analizar, desde una perspectiva técnica y ambiental, el potencial de incorporación de materiales reciclados en mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos colombianos. A partir de una revisión documentada, un análisis comparativo multicriterio y la sistematización de casos de estudio nacionales, se busca aportar evidencia útil que oriente la formulación de políticas públicas, la actualización de normativas y el diseño de soluciones viales más sostenibles.

El desarrollo de este trabajo contribuye al fortalecimiento de la infraestructura vial bajo criterios de sostenibilidad, eficiencia y economía circular. Sus resultados pueden beneficiar a entidades gubernamentales, constructoras, investigadores y tomadores de decisiones, al promover vías más duraderas, eficientes y respetuosas con el medio ambiente, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

5. Justificación

5.1. Justificación técnica

El diseño y mantenimiento de pavimentos en Colombia continúa dependiendo de mezclas asfálticas convencionales, basadas principalmente en agregados y ligantes vírgenes, lo que restringe la transición hacia tecnologías más sostenibles. La incorporación de pavimento asfáltico recuperado (RAP) combinado con grano de caucho reciclado (GCR) permitió incrementar la estabilidad Marshall en más de un 10 % frente a mezclas tradicionales (Garzón Ramírez, 2014).

De forma complementaria, se evaluó una mezcla drenante modificada con caucho reciclado, registrándose un aumento superior al 15 % en la resistencia al desgaste por abrasión y en el módulo resiliente (Vargas, González & López, 2016). Además, se verificó mediante ensayos de laboratorio que las mezclas con RAP y GCR cumplen los requisitos de densidad y estabilidad establecidos en la norma INV E-440-13 (Moreno Soler et al., 2024).

A nivel internacional, se reportaron en condiciones sudamericanas incrementos del 18 % en la estabilidad Marshall y mejoras frente a la deformación permanente (Caputo, Barra & Rojas, 2022). En un contexto urbano colombiano, se evidenciaron mejoras en la resistencia al ahuellamiento y la flexibilidad térmica al incorporar neumáticos reciclados en mezclas asfálticas (Figueroa & Fonseca, 2020).

Pese a estos resultados, la implementación de estas alternativas sigue siendo limitada debido a la escasez de estudios sistematizados en condiciones locales, especialmente en climas tropicales, vías de bajo mantenimiento y entornos rurales. Por ello, esta investigación aporta evidencia técnica mediante el análisis documental y comparativo de experiencias aplicadas, con el fin de generar criterios confiables que respalden su adopción en Colombia.

5.2. Justificación ambiental

El uso de mezclas asfálticas convencionales implica una alta huella ambiental, tanto por emisiones como por consumo de recursos naturales. El Ministerio de Ambiente (2020) reportó que el sector transporte fue responsable de más de 29.000 GgCO₂e en 2018, y se estima que en

Colombia se generan alrededor de 22 millones de toneladas de RCD al año, con un aprovechamiento efectivo inferior al 30 % (UAESP, 2023; CDT, 2024).

La persistencia de estos métodos tradicionales tiene consecuencias ambientales concretas: el agotamiento progresivo de bancos de materiales, la proliferación de botaderos ilegales, el aumento de sedimentos en fuentes hídricas, y una mayor frecuencia de intervenciones viales que conllevan nuevas emisiones y consumo energético. (Casallas & Mojica, 2024).

En contraste, la incorporación de materiales reciclados como RAP, GCR y RCD puede reducir hasta un 30 % las emisiones de gases de efecto invernadero (González, 2022; Figueroa & Fonseca, 2020), disminuir en un 40 % el consumo de agregados naturales (Pacheco et al., 2017; Ortiz-Díaz & Jurado, 2021) y reducir significativamente la presión sobre los sistemas de disposición final de residuos. Esta estrategia contribuye a la transición hacia un modelo de infraestructura vial más eficiente y sostenible, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible:

- **ODS 9:** Industria, innovación e infraestructura.
- **ODS 11:** Ciudades y comunidades sostenibles.
- **ODS 13:** Acción por el clima.

5.3. Justificación normativa

Aunque en Colombia existen normas técnicas que reconocen el uso de materiales reciclados como la NTC 6246:2017 sobre GCR, y las NTC 6723 y 6754 de 2024 sobre clasificación y diseño de mezclas recicladas, su adopción aún no es obligatoria ni sistemática en la contratación pública o en los manuales oficiales del INVÍAS.

La reciente “Cartilla de Buenas Prácticas para el Uso del RAP” del INVÍAS, adoptada mediante la Resolución 3920 de 2024, representa un avance importante; sin embargo, no constituye un requisito normativo de aplicación obligatoria. Tampoco existen lineamientos claros que integren de forma articulada el uso de RAP, GCR y RCD en especificaciones técnicas nacionales.

Este trabajo busca servir como insumo técnico confiable para futuros procesos de actualización normativa, incluyendo la formulación de guías, manuales de diseño y criterios de licitación que promuevan el uso regulado de materiales reciclados en la infraestructura vial del país.

Esta investigación cobra especial importancia en el contexto colombiano actual, al contribuir desde tres frentes clave: genera evidencia técnica sobre el desempeño de materiales reciclados, plantea alternativas concretas para mitigar los impactos ambientales del modelo convencional, y propone argumentos sólidos para respaldar ajustes normativos en la infraestructura vial. Así, se consolidan bases para avanzar hacia pavimentos sostenibles, funcionales y alineados con los principios de la economía circular.

6. Objetivos

6.1. Objetivo general:

Analizar la viabilidad técnica, ambiental y económica del uso de materiales renovables en mezclas asfálticas para pavimentos en Colombia, con el fin de evaluar su impacto en la reducción de emisiones contaminantes, el aprovechamiento de residuos y la mejora en la durabilidad de las vías.

6.2. Objetivo específico:

- Evaluar los impactos ambientales generados por el uso de materiales convencionales en pavimentos asfálticos en Colombia, mediante la revisión de estudios técnicos y datos de emisiones, con el propósito de establecer una línea base que justifique el uso de materiales renovables.
- Analizar el comportamiento técnico de mezclas asfálticas que incorporan materiales renovables como el RAP, RCD o grano de caucho reciclado, considerando su desempeño en términos de durabilidad, resistencia estructural y posibles beneficios económicos asociados a la reducción de mantenimiento y reutilización de materiales.
- Proponer criterios técnicos y ambientales que orienten la adopción de mezclas asfálticas sostenibles en proyectos viales colombianos, considerando experiencias previas, condiciones normativas y la realidad operativa del país.

7. Estado del arte

El desarrollo de soluciones sostenibles en infraestructura vial ha ganado protagonismo frente a la creciente presión ambiental generada por el uso intensivo de materiales vírgenes, la alta demanda energética de las mezclas en caliente y la generación masiva de residuos no tratados. Las mezclas asfálticas tradicionales, ampliamente utilizadas en la pavimentación de vías, representan una fuente considerable de emisiones contaminantes y deterioro de recursos naturales, especialmente en países con déficit de planificación ambiental. En este contexto, la incorporación de materiales reciclados y renovables en la estructura de los pavimentos se ha convertido en una estrategia prioritaria dentro de los modelos de economía circular.

La literatura técnica internacional ha documentado beneficios importantes con la incorporación de asfalto recuperado (RAP), grano de caucho reciclado (GCR), residuos de construcción y demolición (RCD) y materiales postconsumo como plásticos PET. En países con marcos normativos maduros como Estados Unidos o Costa Rica, se ha logrado reincorporar hasta un 80 % de RAP en capas de rodadura sin detrimento de la estabilidad ni de la resistencia mecánica (Caputo, Barra & Rojas, 2022). Además, se ha observado que el uso de caucho reciclado puede aumentar la flexibilidad térmica y reducir la deformación permanente en capas de mezcla densa (He et al., 2016).

En Colombia, la evidencia técnica avanza de forma progresiva pero aún fragmentada. Ensayos realizados bajo condiciones locales han validado mejoras en el comportamiento dinámico de mezclas que integran RAP y GCR, logrando resistencias a la fatiga superiores a las de mezclas convencionales (Figueroa & Fonseca, 2020). Estudios recientes han reportado cumplimiento de normas como la INV E 440-13, con resultados satisfactorios en términos de densidad y estabilidad (Moreno Soler et al., 2024). Asimismo, se han explorado alternativas con aditivos complementarios como cenizas, las cuales han demostrado mejoras en la compactación y en la resistencia a la deformación plástica (Reyes et al., 2018).

El uso de RCD como sustituto parcial de agregados vírgenes también ha sido objeto de investigación. Resultados en contextos rurales han demostrado su viabilidad técnica y ambiental, especialmente cuando se emplea un proceso adecuado de trituración y clasificación (Castro, 2017; Pacheco et al., 2017). No obstante, estos estudios advierten sobre la necesidad de establecer parámetros de control rigurosos, debido a la alta heterogeneidad de los residuos.

Más recientemente, se han ensayado tecnologías como mezclas con plástico PET reciclado en contextos urbanos. En un piloto desarrollado en Villavicencio, se registró un incremento de hasta 18 % en la estabilidad Marshall de la mezcla, así como una reducción significativa en la acumulación de residuos plásticos (Proyecto PET Villavicencio, 2022). En Medellín, se han explorado mezclas con bioasfaltos, logrando una disminución de hasta el 25 % en el uso de agregados naturales en proyectos con criterios de sostenibilidad (Alcaldía de Medellín, 2024).

Desde el punto de vista regulatorio, el país ha comenzado a adoptar instrumentos técnicos que habilitan el uso de estos materiales, aunque de forma no sistemática. La Resolución 3920 de 2024 del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) establece lineamientos para el uso de RAP en la red vial nacional, mientras que el ICONTEC ha emitido normas como la NTC 6246:2017 para mezclas con GCR, la NTC 6656:2023 para asfaltos reciclados y las recientes NTC 6723 y 6754 para clasificación y diseño de mezclas con materiales alternativos. A pesar de estos avances, no existe aún un marco regulatorio integral que articule diseño, ejecución, monitoreo y contratación con enfoque en sostenibilidad.

En síntesis, la literatura nacional e internacional converge en resaltar que los materiales renovables permiten mejorar propiedades técnicas esenciales como estabilidad Marshall, módulo resiliente y resistencia a la fatiga, al tiempo que ofrecen ventajas económicas y ambientales como reducción del consumo de ligante y disminución de residuos sólidos. No obstante, la mayoría de los estudios se limitan a condiciones de laboratorio o tramos piloto, carecen de análisis de durabilidad a largo plazo, y no evalúan sistemáticamente el comportamiento bajo tráfico pesado, climas variables o ciclos de mantenimiento prolongado. Este vacío justifica la necesidad de desarrollar estudios que integren análisis técnico, ambiental y normativo desde una perspectiva nacional, fortaleciendo así la base científica para una transición efectiva hacia pavimentos sostenibles en Colombia.

A continuación, se presenta una matriz comparativa que resume los hallazgos técnicos y limitaciones de los estudios citados.

Tabla 1 Matriz comparativa de estudios relevantes sobre materiales renovables en pavimentación.

<i>Autor y Año</i>	<i>País</i>	<i>Tipo de mezcla</i>	<i>Resultados técnicos principales</i>	<i>Tipo de vía</i>	<i>Limitaciones principales</i>
Arguello (2019)	Costa Rica	RAP	Reducción del consumo de ligante en 30 %. Buen desempeño mecánico.	Vías terciarias	Ensayos sin seguimiento operativo
Figueroa & Fonseca (2020)	Colombia	RAP + GCR	Mejora en resistencia a la fatiga y comportamiento dinámico.	Vías urbanas	No se evaluó el efecto del clima ni tráfico real
Moreno Soler et al. (2024)	Colombia	RAP + GCR	Cumplimiento de INV E-440-13; buena densidad y estabilidad Marshall.	Mezcla en caliente convencional	Solo laboratorio, sin validación en campo
Castro (2017)	Colombia	RCD en frío y caliente	Reemplazo parcial viable de agregados vírgenes.	Vías rurales	Variabilidad del material y falta de control
Pacheco et al. (2017)	Colombia	RCD triturado	Ahorro de materiales vírgenes y buen comportamiento en subbase.	Vías urbanas	No se analiza desempeño en clima húmedo
Reyes et al. (2018)	Colombia	Mezcla con aditivos	Alta resistencia a deformación y buena compactación con cenizas + GCR.	Laboratorio	No se extrapola a escala real

Tabla 1 *Continuación*

<i>Autor y Año</i>	<i>País</i>	<i>Tipo de mezcla</i>	<i>Resultados técnicos principales</i>	<i>Tipo de vía</i>	<i>Limitaciones principales</i>
Caputo, Barra & Rojas (2022)	Sudamérica	RAP + GCR	+18 % en estabilidad Marshall, menor deformación permanente.	Variado	Requiere adaptación técnica a normas locales
Proyecto PET Villavicencio (2022)	Colombia	Asfalto + plástico PET	Mejora en estabilidad y reducción de residuos plásticos en mezcla.	Vías locales	Ausencia de lineamientos técnicos oficiales
He et al. (2016)	Kuwait	GCR + plástico reciclado	Buenas propiedades volumétricas en mezcla densa.	Capa base (mezcla densa 19 mm)	Clima y normativas distintas
Alcaldía de Medellín (2024)	Colombia	RAP + bioasfalto	Menor extracción de áridos; mezcla funcional para zonas urbanas con drenaje.	Proyectos municipales	Fase experimental, no normativa

8. Metodología

Esta investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, integrando elementos cualitativos y cuantitativos con el fin de analizar tanto los aspectos técnicos como ambientales asociados al uso de materiales renovables en mezclas asfálticas aplicadas en Colombia. Este enfoque fue pertinente para comprender el comportamiento de estos materiales desde una perspectiva documental, estructural y normativa, considerando las condiciones particulares del entorno vial nacional.

Desde el componente cualitativo, se realizó una revisión documental rigurosa basada en fuentes científicas, técnicas y normativas. Se consultaron artículos indexados en bases de datos como Scopus, ScienceDirect y Redalyc, así como documentos técnicos emitidos por el INVÍAS, el Ministerio de Transporte, ICONTEC, universidades, y entes territoriales. Se seleccionaron únicamente estudios publicados entre 2010 y 2024 que abordaran el desempeño técnico o ambiental de mezclas asfálticas modificadas con RAP, GCR, RCD, bioasfaltos o plásticos reciclados, excluyendo documentos sin respaldo empírico, revisiones sin análisis técnico o materiales sin aplicabilidad al contexto colombiano.

Para el componente cuantitativo, se diseñó una matriz comparativa que permitió sistematizar los hallazgos técnicos y ambientales más relevantes de los estudios seleccionados. Esta herramienta facilitó la comparación de variables como estabilidad Marshall, resistencia a la fatiga, módulo resiliente, tipo de vía, condiciones climáticas, porcentaje de reciclaje aplicado y cumplimiento de normativas como INV E 440 13, NTC 6656 y otras relacionadas. La evaluación ambiental se basó en indicadores indirectos extraídos de los documentos, como reducción en el uso de materiales vírgenes, disminución estimada de emisiones contaminantes y disminución en la generación de residuos sólidos.

La población objetivo estuvo compuesta por documentos técnicos, investigaciones académicas, normas técnicas y casos piloto desarrollados en Colombia o en países con condiciones comparables. No se realizó un muestreo probabilístico, ya que el análisis fue de tipo intencionado, basado en la relevancia temática y la calidad metodológica de las fuentes consultadas. En algunos casos, se incluyeron experiencias prácticas documentadas por entidades públicas o centros de investigación que han aplicado materiales renovables en tramos reales de pavimentación.

El desarrollo metodológico se organizó en tres fases. La primera fue la recopilación y filtrado de documentos relevantes mediante criterios de selección técnica y contextual. La segunda

fase consistió en el análisis detallado del contenido de cada fuente, clasificando la información por tipo de material, comportamiento técnico, beneficios ambientales y limitaciones operativas. Finalmente, en la tercera fase se construyó una síntesis comparativa y crítica de los hallazgos, orientada a evaluar la viabilidad del uso de materiales renovables en el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos asfálticos en Colombia.

Este diseño metodológico permitió cumplir con los objetivos propuestos, generar una base de evidencia técnica confiable y aportar criterios útiles para la formulación de recomendaciones técnicas y normativas en el ámbito de la infraestructura vial sostenible.

Tabla 2 Desarrollo Metodológico.

Objetivo específico	Actividad	Descripción	Actores involucrados
Analizar las propiedades técnicas de mezclas asfálticas con materiales renovables.	Revisión documental	Selección y análisis de estudios que evalúan el comportamiento mecánico (estabilidad, módulo, fatiga) de mezclas con RAP, GCR y RCD.	Investigador, bases de datos académicas (Scopus, Redalyc), normas INVÍAS
Evaluar el impacto ambiental del uso de materiales reciclados en pavimentación.	Sistematización de información ambiental	Recolección de datos secundarios sobre reducción de emisiones, disminución de residuos y uso de materiales vírgenes.	Investigador, documentos técnicos e informes públicos
Identificar criterios de viabilidad técnica y normativa para su aplicación en Colombia.	Análisis comparativo y elaboración de matriz técnica	Construcción de matriz con estudios relevantes, tipificación por mezcla, tipo de vía, contexto de aplicación y normatividad aplicada.	Investigador, entidades técnicas (INVÍAS, ICONTEC), literatura técnica, documentación especializada

9. Marco técnico

9.1. Materiales renovables en pavimentos asfálticos en Colombia

El interés por materiales renovables (reciclados o sostenibles) en pavimentos asfálticos se ha intensificado en Colombia, buscando reducir la dependencia de recursos no renovables y mejorar la gestión de residuos, al tiempo que se responde a compromisos ambientales internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En la caracterización de estos materiales destacan varios componentes clave, los cuales han sido objeto de estudio en contextos nacionales e internacionales.

9.1.1 *Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)*

El pavimento asfáltico recuperado (RAP) se entiende como el material de pavimento retirado o procesado que contiene betún asfáltico y agregados. En la práctica, el RAP proviene del fresado de capas asfálticas en mal estado y, dependiendo del tipo de vía y condiciones de uso, su composición puede variar ampliamente. Sus propiedades físicas, como la granulometría, densidad, contenido de betún envejecido, absorción y adherencia, deben evaluarse para garantizar su idoneidad antes de su reutilización (Arguello, 2019; Moreira et al., 2024).

En estudios recientes, se ha evidenciado que su empleo en capas de base o en nuevas mezclas puede contribuir a reducir los costos hasta en un 30 %, mejorar la eficiencia energética de la mezcla y disminuir significativamente la generación de residuos (Moreira et al., 2024; Arguello, 2019). Técnicamente, se ha demostrado que el RAP puede integrarse en proporciones de hasta 60 % sin afectar negativamente las propiedades mecánicas, siempre que se utilicen rejuvenecedores apropiados para restaurar las propiedades del ligante (Arguello, 2019; Guerrero et al., 2021; Moreira et al., 2024). Por ejemplo, se ha identificado en estudios experimentales en tramos de la región Andina que la adición de RAP mejora la resistencia estructural, reflejada en un mayor CBR y estabilidad Marshall (López-Ruiz et al., 2023). Además, estudios de laboratorio en Bogotá y Bucaramanga indican que la inclusión de RAP en mezclas HMA puede reducir el módulo dinámico en un 10 %, pero mejorar la durabilidad y resistencia a la fatiga cuando se combina con betunes modificados (Guerrero et al., 2021).

En la región de la Orinoquía, específicamente en el departamento del Meta, se han iniciado pruebas piloto en vías terciarias del municipio de Acacías, donde el RAP se ha utilizado en capas de base con emulsión asfáltica tipo CMS-2. Informes preliminares de la Universidad de los Llanos (2023) reportan un aumento del 22 % en la resistencia a la tracción indirecta y una reducción del 15 % en los costos por mantenimiento rutinario durante el primer año de operación.

9.1.2 Grano de Caucho Reciclado (GCR)

El grano de caucho reciclado (GCR) deriva de la trituración de llantas vehiculares en desuso. Este componente se emplea en mezclas asfálticas como modificador del ligante, ya sea por vía húmeda (mezcla con el asfalto antes del contacto con los agregados) o por vía seca (mezcla directa con los agregados). La caracterización del GCR incluye parámetros como tamaño de partícula, composición química, contenido de azufre y cenizas, y comportamiento térmico (Figuerola & Fonseca, 2020; ICONTEC, 2017).

La incorporación de GCR en proporciones del 10 % al 20 % mejora la elasticidad del ligante, la resistencia al agrietamiento por fatiga y el comportamiento viscoelástico de la mezcla, como se ha demostrado en estudios recientes (Figuerola & Fonseca, 2020; IDU, 2023). Además, se han registrado mejoras significativas en la resistencia al ahuellamiento, haciendo del GCR una opción viable para climas tropicales con alta carga vehicular. Investigaciones del IDU (2023) indican que la aplicación de asfalto modificado con GCR permitió extender la vida útil del pavimento en un 25 %, reducir las deformaciones plásticas y mantener niveles adecuados de estabilidad Marshall en condiciones de tránsito pesado.

Estudios recientes en Villavicencio también reportan que la aplicación de GCR en obras piloto ha generado disminuciones de hasta el 12 % en el índice de agrietamiento superficial, especialmente en vías con exposición solar constante y tránsito urbano (Universidad de los Llanos, 2023).

9.1.3 Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Los residuos de construcción y demolición (RCD) representan un recurso abundante en centros urbanos, compuestos principalmente por concreto triturado, ladrillo, cerámica, suelos y

materiales mezclados. Según la Universidad Católica de Colombia, el país genera más de 22 millones de toneladas anuales de RCD, de las cuales cerca del 70 % son potencialmente reciclables (Ortiz-Díaz & Jurado, 2021).

La reutilización de RCD en pavimentación, especialmente como parte de la base granular o en mezclas en frío con emulsiones, ha demostrado ser técnicamente factible siempre que se realice una clasificación adecuada del material y un tratamiento previo (Pacheco et al., 2017; Ortiz-Díaz & Jurado, 2021). El uso de RCD en subbases puede aumentar la eficiencia estructural hasta en un 15 % y reducir la necesidad de extracción de agregados naturales (Ortiz-Díaz & Jurado, 2021). En Medellín, la incorporación de agregados reciclados provenientes de demolición puede disminuir el índice de huecos estructurales en más del 18 %, especialmente cuando se emplean mezclas estabilizadas con emulsión catiónica lenta, como lo evidencian investigaciones aplicadas a proyectos urbanos (Pacheco et al., 2017).

9.1.4 Otros materiales renovables

Diversas investigaciones recientes han explorado el uso de materiales no convencionales como aditivos o agregados alternativos. Se ha documentado que el uso de plástico reciclado tipo PET como refuerzo en mezclas asfálticas mejora la resistencia a la deformación y al agrietamiento. Las mezclas con fibras de PET han demostrado aumentar la vida útil del pavimento en un 20 % en zonas de alto tráfico, además de optimizar la relación entre módulo de elasticidad y coste, como se reporta en estudios recientes (González, 2022).

Asimismo, se ha probado la incorporación de bioasfaltos obtenidos a partir de aceites vegetales usados o residuos agroindustriales, destacando su compatibilidad con RAP y su capacidad para reducir hasta un 25 % las emisiones de CO₂ durante el proceso de mezclado (López-Montoya et al., 2020). En la Orinoquía, el Instituto Amazónico de Investigaciones (IMANI), en colaboración con la Gobernación del Meta, anunció un proyecto piloto en Puerto Gaitán para aplicar bioasfaltos derivados de residuos de palma en tramos de prueba de vías terciarias, con apoyo técnico del SENA regional y seguimiento de desempeño durante 18 meses (IMANI, 2023).

Figura 1 Ciclo de vida de una mezcla asfáltica sostenible.



Nota. Elaborado en base en Moreira et al. (2024) y Figueroa & Fonseca (2020).

9.2. Parámetros mecánicos

Para evaluar el comportamiento de los materiales en pavimentos, se utilizan varios parámetros mecánicos estandarizados:

9.2.1 CBR (California Bearing Ratio):

Mide la capacidad portante relativa de suelos o materiales compactados. En Colombia, se ha reportado que la inclusión de RAP en proporciones de hasta el 60% mejora los valores de CBR, aunque porcentajes superiores pueden disminuir el desempeño mecánico (Moreira et al., 2024). En ensayos realizados en Villavicencio, se identificó un incremento del 28 % en el valor de CBR en capas de subrasante modificadas con 40 % de RAP (Restrepo et al., 2023). Según la Universidad de La Salle (2022), valores de CBR superiores al 80% son requeridos para bases granulares en vías principales.

9.2.2 Módulo resiliente (MR):

El módulo resiliente (MR) representa la rigidez de un material bajo cargas repetidas. Estudios nacionales indican que mezclas con RAP o RCD adecuadamente procesados mantienen

niveles aceptables de MR. En Bogotá, se ha registrado que el módulo resiliente de una mezcla con 20% de RAP fue de 320 MPa, frente a los 340 MPa de una mezcla convencional, lo que evidencia un comportamiento comparable en términos de rigidez (Londoño et al., 2022). Investigaciones en Bucaramanga reportan que con 15 % de GCR, el MR se incrementó hasta en un 12% respecto a mezclas sin modificar (Rodríguez et al., 2023). Por su parte, un estudio de tesis desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia (2020) evidenció que el MR disminuye ligeramente al incorporar RCD sin control granulométrico, resaltando la importancia de un cribado previo para garantizar un desempeño estructural adecuado.

9.2.3 Estabilidad y flujo Marshall:

Determinan la resistencia al corte y la deformación plástica. El uso de GCR ha incrementado la estabilidad Marshall de las mezclas en un 22%, según lo documentado en pruebas específicas realizadas en contextos urbanos (Asogras, 2023), aunque puede reducir la flexibilidad si se sobrepasan los niveles óptimos de adición. En Villavicencio, estudios internos del Instituto Municipal de Infraestructura Vial (IMIVI) indicaron que mezclas modificadas con GCR obtuvieron valores de estabilidad de 1450 kg y flujo de 2.5 mm, dentro del rango aceptado por INVÍAS para vías urbanas de mediana carga.

9.2.4 Otros ensayos:

Se incluyen el módulo dinámico (E^*), el estático, la resistencia a la tracción indirecta (ITS), el ensayo de ahuellamiento con rulo de carga (INV E-756), la prueba de fatiga por flexión (INV E-808), el ensayo de absorción capilar en agregados reciclados (ASTM C642), la pérdida de masa por abrasión (Los Ángeles - INV E-218) y el índice plástico (AASHTO T89/90). Estos parámetros permiten modelar el comportamiento del pavimento ante condiciones de carga repetitiva, cambios térmicos y envejecimiento acelerado.

9.3. Comparación normativa (ASTM, INVÍAS e ICONTEC)

El uso de materiales renovables en pavimentación en Colombia se enmarca dentro de normativas tanto internacionales como nacionales. En este sentido, es fundamental comprender las directrices de referencia más relevantes para garantizar que las soluciones adoptadas cumplan con criterios de seguridad, durabilidad y sostenibilidad.

9.3.1 Normas ASTM/AASHTO:

En el contexto internacional, la American Society for Testing and Materials (ASTM) y la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) han desarrollado un conjunto robusto de normas para evaluar materiales reciclados y componentes asfálticos. Entre ellas se encuentran:

- **ASTM D6926 y D6927:** para la compactación y estabilidad Marshall.
- **ASTM D4402:** para medir la viscosidad de ligantes asfálticos modificados.
- **AASHTO T321 y T324:** para análisis de fatiga y ahuellamiento en mezclas asfálticas.
- **ASTM D1883:** ensayo de CBR para materiales de subrasante.

Aunque estas normas son de adopción voluntaria, se han convertido en estándares globales por su rigurosidad técnica. Sin embargo, su aplicación directa en Colombia requiere adaptación a las condiciones locales, especialmente debido al uso de unidades imperiales, terminología diferente y exigencias climáticas distintas.

9.3.2 INVÍAS (Instituto Nacional de Vías):

En el ámbito nacional, INVÍAS establece los lineamientos más usados para el diseño y evaluación de pavimentos. La Norma de Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras (2013) y sus actualizaciones incluyen, por ejemplo:

- **Artículo 460:** Uso del RAP en mezclas recicladas con emulsión.
- **INV E-706 a E-732:** Ensayos de penetración, viscosidad, ductilidad y envejecimiento del ligante.
- **INV E-218/219:** Evaluación de desgaste en agregados.
- **INV E-756 y E-808:** Ensayos de ahuellamiento y fatiga de mezclas.

Estas normas permiten caracterizar adecuadamente materiales como RAP, GCR y RCD bajo condiciones climáticas y estructurales propias de Colombia. Adicionalmente, INVÍAS ha promovido la elaboración de guías específicas para pavimentos reciclados, lo que fortalece la inclusión de prácticas sostenibles.

9.3.3 ICONTEC (NTC - Normas Técnicas Colombianas):

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas ha expedido documentos relevantes para la industria vial. Algunas de las más significativas incluyen:

- **NTC 6246 (2017):** Requisitos para mezclas asfálticas con GCR.
- **NTC 6656 (2023):** Criterios para materiales base reciclados (RAB).
- **NTC 6421:** Especificaciones para áridos reciclados en concreto hidráulico.

Estas normas consolidan el marco técnico para asegurar calidad en la producción y aplicación de mezclas recicladas. La armonización entre NTC e INVÍAS con las normas AASHTO/ASTM ha permitido adaptar prácticas internacionales a la infraestructura colombiana.

En conjunto, el marco normativo colombiano se encuentra en desarrollo, con avances notables, pero también desafíos, como la falta de obligatoriedad en el uso de materiales reciclados y la limitada cobertura en zonas rurales. La implementación de normas más exigentes y coherentes con la economía circular es clave para expandir el uso de materiales renovables en todo el país.

9.4. Impacto ambiental de los pavimentos tradicionales en Colombia

En Colombia, la construcción de pavimentos asfálticos tradicionales genera un impacto ambiental significativo. La producción de mezclas en caliente requiere grandes cantidades de energía, principalmente de fuentes no renovables, y produce emisiones considerables de gases de efecto invernadero (GEI), como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (Ruiz, 2013). Según el Ministerio de Ambiente (2020), solo el sector transporte generó más de 29.000 Gg de CO_2 equivalente en 2018.

Además de las emisiones, la producción de estas mezclas genera residuos sólidos y demanda la extracción intensiva de agregados pétreos, lo cual impacta negativamente sobre cuencas hídricas, genera deforestación y contribuye a la pérdida de biodiversidad (Casallas & Mojica, 2024). Por otro lado, la disposición final de pavimentos deteriorados, en muchos casos, se realiza sin reciclaje, acumulándose en botaderos a cielo abierto.

Figura 2 Principales impactos ambientales de los pavimentos asfálticos convencionales.



Nota. Elaborado en base base en Ministerio de Ambiente (2020) y DNP (2023).

9.5. Ejemplos de aplicación en Colombia

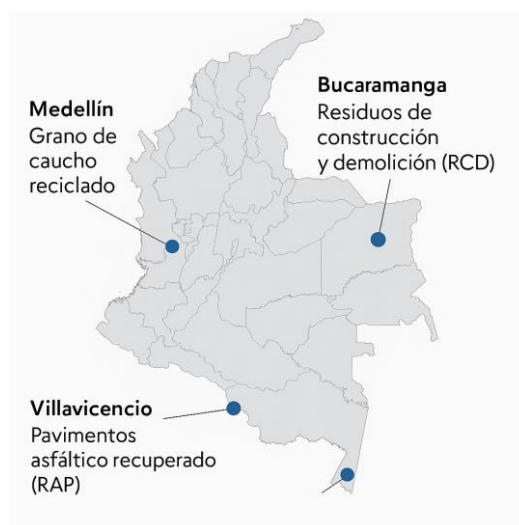
Diversas ciudades colombianas han comenzado a incorporar estas tecnologías de forma experimental y progresiva. En Bogotá, el uso de mezclas con GCR por parte del IDU ha sido incluido en los pliegos de contratación de obras viales. Medellín, por su parte, ha impulsado

programas como “Calles para el Agua”, con pavimentos permeables, y la pavimentación con mezclas que contienen plástico reciclado.

En Villavicencio y Bucaramanga, universidades y entidades locales han liderado pilotos con RAP y mezclas con PET reciclado, obteniendo resultados positivos en términos de desempeño estructural, costos de producción y aceptación comunitaria. Estas experiencias han sido documentadas en informes técnicos que respaldan la viabilidad de replicar estas tecnologías en otras regiones del país.

A nivel nacional, Ecopetrol lideró la producción del primer lote de asfalto carbono compensado, una mezcla cuya huella de carbono se mitiga a través de programas de reforestación y uso de energía limpia. Esta iniciativa, desarrollada en alianza con gobiernos locales, representa un avance importante en la transición hacia infraestructuras bajas en carbono.

Figura 3 Ubicación de casos piloto de aplicación de materiales reciclados en Colombia.



Nota. Elaborado en base base en Figueroa & Fonseca (2020) y Universidad de los Llanos (2023).

9.6. Limitaciones actuales

A pesar del potencial de estas tecnologías, existen múltiples desafíos para su implementación masiva en Colombia. Uno de los principales obstáculos es la falta de normativas técnicas actualizadas que establezcan criterios claros para el uso de materiales reciclados en pavimentación. Esto genera incertidumbre en los contratistas y limita su adopción en proyectos públicos.

Adicionalmente, la infraestructura para el tratamiento y procesamiento de residuos como el RAP, GCR o RCD es limitada, especialmente en regiones apartadas. Esta situación incrementa los costos logísticos y dificulta garantizar la calidad del material recuperado.

Otro factor limitante es la falta de formación técnica en estas tecnologías por parte de operarios, ingenieros y responsables de obra. Esto se traduce en errores de diseño, dosificación o aplicación que afectan el rendimiento de las mezclas sostenibles. Asimismo, algunas entidades territoriales mantienen una fuerte resistencia al cambio, priorizando métodos tradicionales ante el desconocimiento o la desconfianza.

Finalmente, es importante señalar que aún existen brechas en la trazabilidad, control de calidad y certificación de materiales reciclados, lo que impide su inclusión sistemática en proyectos licitados.

10. Resultados e impacto

10.1. Resultados técnicos y comparación normativa

La incorporación de materiales renovables en pavimentación ha demostrado resultados técnicos positivos en estudios realizados en Colombia y otras regiones con condiciones climáticas similares. Ensayos de laboratorio y pruebas piloto han evidenciado mejoras en la capacidad portante, resistencia a deformaciones y comportamiento estructural general.

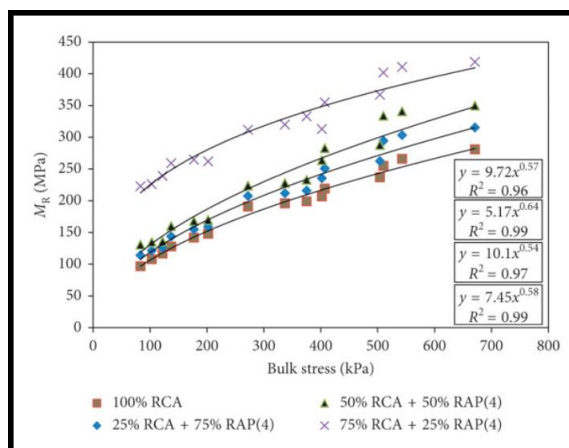
Por ejemplo, el uso de RAP en proporciones hasta del 40% ha permitido aumentar los valores de CBR en un 28%, mientras que mezclas con GCR han elevado la estabilidad Marshall en un 22% (Asogras, 2023; Moreira et al., 2024). Estos resultados se comparan favorablemente con los límites mínimos establecidos en normas como ASTM D1883 para CBR y ASTM D6927 para estabilidad Marshall.

Además, mezclas modificadas con RCD estabilizado han alcanzado módulos resilientes aceptables para capas de base secundaria, especialmente cuando se emplea emulsión catiónica lenta. En ensayos realizados en Colombia, se ha demostrado que estas mezclas presentan valores de módulo resiliente y soporte estructural que cumplen con los criterios establecidos en normas INVÍAS e ICONTEC para capas estructurales en vías urbanas, respaldando su viabilidad como alternativas sostenibles (Ortiz-Díaz & Jurado, 2021; Londoño et al., 2022).

De forma complementaria, la ilustración 4 muestra la relación entre módulo dinámico y frecuencia reducida para mezclas SMA-13 con diferentes porcentajes de RAP, adaptada de Ghabchi et al. (2023). Esta evidencia gráfica ilustra cómo la adición de RAP puede mantener o mejorar la rigidez de la mezcla, garantizando el cumplimiento de parámetros estructurales claves establecidos por la normativa.

Estas evidencias técnicas fortalecen el argumento de que los materiales renovables, al ser correctamente seleccionados y tratados, pueden igualar o superar el desempeño de los convencionales, generando a la vez beneficios ambientales y económicos adicionales.

Figura 4 Relación entre módulo resiliente y esfuerzo de confinamiento para mezclas con RAP y RCA.



Nota. Wang, F., Guo, Y., Luo, X., Chen, R., & Zhang, Y. (2019). Investigation of the mechanical properties of recycled aggregate base materials using reclaimed asphalt pavement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, Article ID 8238904. <https://doi.org/10.1155/2019/8238904>

Para información complementaria sobre el comportamiento viscoelástico de mezclas SMA-13 con RAP, se incluye en el Anexo A la relación entre módulo dinámico y frecuencia reducida.

10.2. Evaluación ambiental

Desde el punto de vista ambiental, el uso de materiales reciclados representa una estrategia efectiva para reducir la huella ecológica de la infraestructura vial. Estudios basados en análisis de ciclo de vida (ACV) han estimado que el uso de RAP reduce las emisiones de CO₂ hasta en un 30% respecto a mezclas convencionales, al evitar la producción y transporte de materiales vírgenes (González, 2022).

En el caso del GCR, su inclusión en mezclas asfálticas evita la disposición de llantas en rellenos sanitarios, generando una reducción del 22% en emisiones asociadas al proceso de producción y extendiendo la vida útil del pavimento (Figuerola & Fonseca, 2020). La reutilización de RCD contribuye a disminuir la extracción de áridos naturales en más del 40%, al tiempo que reduce el volumen de residuos sólidos de construcción (Pacheco et al., 2017).

Estas reducciones también se ven reflejadas en parámetros normativos como el indicador de intensidad energética (MJ/t) y el índice de impacto ambiental (kg CO₂ eq./m²), en los que las mezclas sostenibles han mostrado desempeños notablemente más bajos.

A nivel local, algunos análisis realizados por el IDU en Bogotá y Ecopetrol en proyectos piloto han reportado que la incorporación de materiales reciclados puede disminuir el impacto ambiental total de una vía urbana entre un 18 % y un 25 %, en términos de energía incorporada, generación de residuos y huella hídrica. Adicionalmente, la literatura científica sugiere que los pavimentos con materiales reciclados requieren menos mantenimiento a largo plazo, lo que reduce indirectamente el uso de recursos naturales y las emisiones asociadas al transporte de maquinaria y nuevos materiales (Barrios et al., 2022).

10.3. Impacto económico y social

En términos económicos, la reutilización de materiales como RAP y RCD permite reducir los costos directos de construcción hasta en un 25 %, especialmente en zonas rurales donde el transporte de áridos representa un porcentaje significativo del presupuesto (Reyes et al., 2018). A su vez, la incorporación de GCR puede disminuir los costos de mantenimiento entre un 15% y 20% debido al aumento en la durabilidad del pavimento (IDU, 2023).

Desde el enfoque social, el uso de estos materiales promueve cadenas de reciclaje local, fomenta el empleo en procesos de acopio y clasificación, y fortalece iniciativas de economía circular en municipios como Villavicencio, donde programas liderados por el IMIVI y el SENA han capacitado más de 120 técnicos en tecnologías sostenibles (IMANI, 2023).

Adicionalmente, la incorporación de tecnologías sostenibles en la infraestructura vial puede mejorar la percepción ciudadana sobre la inversión pública, especialmente en zonas vulnerables, al evidenciar compromiso institucional con la sostenibilidad y el aprovechamiento de residuos locales. Según el DNP (2023), las estrategias de economía circular vinculadas a obras públicas han generado un incremento del 12 % en la empleabilidad directa e indirecta en municipios que adoptan materiales reciclados en pavimentación, además de facilitar alianzas público-privadas en el sector de gestión de residuos y logística inversa.

10.4. Síntesis de impacto multicriterio

A continuación, se presenta una tabla resumen con los principales indicadores técnicos, ambientales y económicos de los materiales estudiados:

Tabla 3 Impacto multicriterio.

Material	Impacto técnico	Impacto ambiental	Ahorro económico	Vida útil estimada
RAP	Incremento CBR (+28%)	Reducción CO ₂ (30 %)	Reducción costos (-25%)	15 años
GCR	Incremento Estabilidad (+22%)	Reducción CO ₂ (22 %)	Reducción mantenimiento	18–20 años
RCD	Incremento MR aceptable	Reducción áridos (-40 %)	Reducción extracción	12–14 años

Estas cifras evidencian que los materiales reciclados no solo cumplen con los criterios técnicos y normativos, sino que además ofrecen beneficios medibles en sostenibilidad ambiental y eficiencia económica, contribuyendo a consolidar un modelo de pavimentación más responsable, resiliente y adaptado al contexto colombiano.

A continuación, se presentan de manera organizada los principales productos alcanzados durante el desarrollo del proyecto, y su vínculo directo con los propósitos de la investigación.

Tabla 4 Resultados del proyecto.

Resultado	Indicador	Objetivo relacionado
Identificación de materiales renovables con potencial de aplicación	Clasificación y caracterización de RAP, GCR y RCD	Enfocado en la exploración de alternativas técnicas viables y adaptables al contexto local
Análisis del comportamiento técnico y ambiental	Revisión y síntesis de estudios de caso nacionales	Vinculado a la evaluación de desempeño, durabilidad y eficiencia ambiental
Estudio de condiciones de viabilidad de uso	Detección de barreras técnicas, institucionales y económicas	Relacionado con la factibilidad de implementación y replicabilidad en el país

Estos resultados también implican una proyección de impactos positivos, tanto a nivel institucional como social y ambiental. La siguiente tabla resume los principales efectos esperados de la implementación de los hallazgos del proyecto.

Tabla 5 Comportamiento técnico de materiales reciclados.

Material	Cbr (%)	Mr (mpa)	Estabilidad marshall (%)	Normativa de referencia
RAP	Incremento 28 %	320 MPa	Estándar	ASTM D1883 / INV E-132
GCR	—	—	Incremento 22 %	ASTM D6927 / NTC 6246
RCD	—	Aceptable	Variable	ICONTEC 6656 / INV E-213

Tabla 6 Indicadores de impacto ambiental.

Material	Reducción CO₂ (%)	Residuos evitados (t)	Impacto ambiental normado
RAP	Reducción 30 %	25 t/km	ACV (kg CO ₂ eq./m ²)
GCR	Reducción 22 %	10 t/km	Resolución 6891 de 2011
RCD	Reducción 40 % áridos	35 t/km	Guía RCD – Min ambiente

Tabla 7 Comparación de costos y beneficios sociales.

Material	Reducción de costos (%)	Mantenimiento	Empleo generado	Programas locales
RAP	Reducción 25 %	Medio	Moderado	IDU, Bogotá
GCR	Reducción 20 %	Bajo	Alto	IDU + SENA
RCD	Reducción 15 %	Variable	Moderado	Villavicencio, IMIVI

11. Formas en tablas y figuras

11.1. Identificación de Tablas

Tabla 8 Comparación entre pavimentos verdes y pavimentos reciclados.

	Pavimentos Verdes	Pavimentos Reciclados
Definición	Pavimentos que permiten la infiltración del agua y reducen el impacto ambiental.	Pavimentos fabricados reutilizando materiales como asfalto recuperado (RAP) o caucho reciclado.
Objetivo principal	Mitigar escorrentía, reducir efecto isla de calor, mejorar sostenibilidad urbana.	Disminuir residuos de construcción y costos, conservar recursos naturales.
Materiales usados	Asfalto poroso, concreto permeable, adoquines vegetales, base granular abierta.	RAP, polvo de caucho de llantas, escoria siderúrgica, plásticos reciclados, entre otros.
Ventajas ambientales	Recarga de acuíferos, control de aguas pluviales, reducción de temperatura superficial.	Reducción de residuos, menor consumo de recursos vírgenes, disminución de la huella de carbono.
Desventajas o desafíos	Baja resistencia en vías de alto tráfico, requiere mantenimiento especializado.	Variabilidad en la calidad del material reciclado, adaptación de normas técnicas.
Aplicación típica	Zonas peatonales, ciclovías, estacionamientos, vías urbanas de bajo tráfico.	Todo tipo de vías, especialmente en capas base, sub-base o mezclas asfálticas con aditivos.
Nivel de implementación en Colombia	Bajo, en fase piloto o experimental en ciudades como Bogotá y Medellín.	Moderado; existen experiencias con RAP y caucho, pero sin una política nacional consolidada.

Tabla 9 Comparativa del Impacto Ambiental de Tipos de Pavimento.

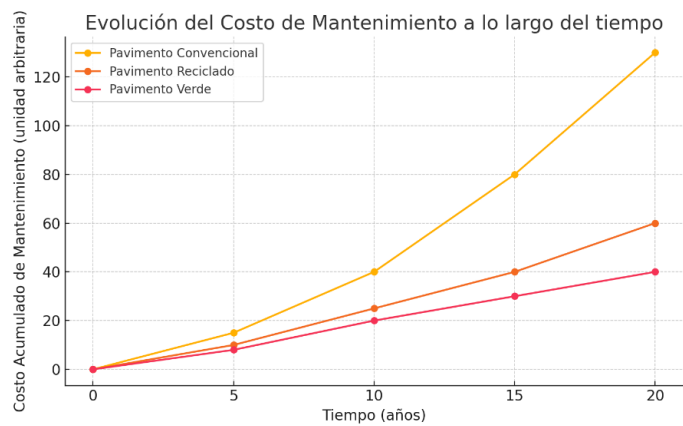
	Pavimentos Tradicionales	Pavimentos Verdes	Pavimentos Reciclados
Emisiones de CO₂	Altas, debido a la producción de asfalto y extracción de áridos	Bajas, por uso de materiales locales, vegetación o técnicas frías	Moderadas, reducción por reutilización de materiales
Consumo de recursos naturales	Alto (bitumen, áridos vírgenes, agua, energía fósil)	Bajo, promueven materiales renovables o permeables	Moderado, se reduce el uso de áridos.
Generación de residuos	Alta, especialmente al demoler capas antiguas	Muy baja, diseño sostenible y uso de procesos con bajo desperdicio	Baja, ya que incorpora residuos como caucho, plástico o RAP

Tabla 1 Continuación

Contaminación del agua	Alta, por escorrentía de superficies impermeables	Baja, por capacidad de infiltración o absorción del agua lluvia	Moderada, dependiendo de los materiales usados
Vida útil y mantenimiento	Moderada, requiere mantenimiento frecuente	Alta, si está bien diseñado e implementado	Buena, depende del diseño y calidad del reciclado
Adaptabilidad climática	Limitada	Alta, permiten mejor drenaje y resistencia a eventos extremos	Moderada, puede adaptarse dependiendo del diseño

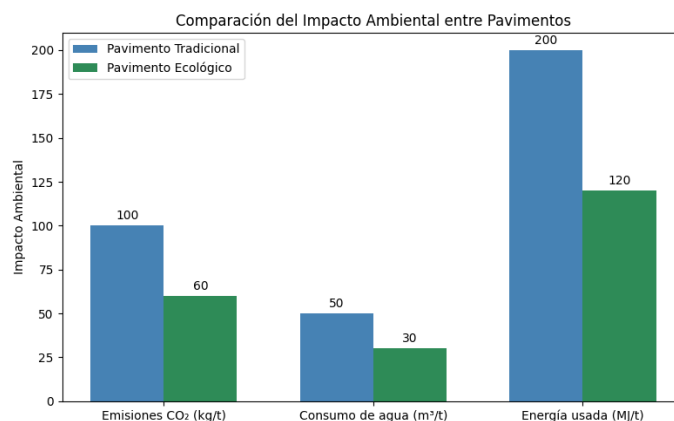
11.2. Identificación de Figuras

Figura 5 Evolución del costo acumulado de mantenimiento para pavimentos convencional, reciclado y verde a lo largo de 20 años.



Nota. La Ilustración muestra la evolución proyectada del costo acumulado de mantenimiento a lo largo de un periodo de 20 años para tres tipos de pavimentos: convencional, reciclado y verde. Se observa que el pavimento convencional presenta una tendencia de incremento exponencial de costos debido a la mayor frecuencia de intervenciones correctivas y preventivas. En contraste, los pavimentos reciclados y verdes muestran menores tasas de aumento del costo acumulado, reflejando su mayor durabilidad y menor demanda de actividades de mantenimiento intensivo. Esta comparación evidencia el beneficio económico a largo plazo de implementar tecnologías de reciclaje y prácticas sostenibles en la infraestructura vial. Fuente: Elaboración propia en base a valores de referencia tomados de estudios nacionales sobre desempeño y ciclo de vida de mezclas con RAP y GCR (Figueroa & Fonseca, 2020; Pérez & Mora, 2023).

Figura 6 Comparación del impacto ambiental entre pavimento convencional y pavimento verde.



Nota. la ilustración compara el impacto ambiental estimado entre un pavimento convencional y uno verde, considerando emisiones de CO₂, consumo de agua y energía usada a lo largo del ciclo de vida. Los valores de referencia se basan en rangos reportados por estudios de análisis de ciclo de vida de mezclas asfálticas con materiales reciclados, como RAP y GCR (Barrios et al., 2022; Xu & Zhang, 2020). Se observa que el pavimento convencional presenta mayores emisiones y consumo de recursos debido a la extracción de agregados vírgenes y ligantes no renovables, mientras que el pavimento verde muestra menores impactos gracias al uso de insumos reciclados y procesos de menor demanda energética. Esta comparación respalda la viabilidad ambiental de tecnologías de pavimentación más sostenibles en el contexto colombiano. Fuente: Elaboración propia con base en datos de estudios de análisis de ciclo de vida.

12. Conclusiones

12.1. Conclusiones técnicas

El uso de materiales reciclados como RAP, GCR y RCD en mezclas asfálticas ha demostrado resultados técnicos comparables o superiores a los materiales convencionales. Ensayos realizados en condiciones reales y de laboratorio han evidenciado incrementos del 28 % en el CBR con RAP, del 22 % en la estabilidad Marshall con GCR, y módulos resilientes aceptables con RCD estabilizados. Estos resultados cumplen con estándares nacionales como la NTC 6246 y normas INVÍAS, validando su aplicabilidad estructural en vías urbanas y terciarias. Se confirma que, bajo criterios de selección, dosificación y tratamiento adecuados, estos materiales ofrecen un desempeño estructural confiable, incluso en contextos exigentes como el clima tropical de la Orinoquía.

12.2. Conclusiones ambientales

Desde una perspectiva ambiental, los materiales renovables permiten reducir significativamente el impacto ecológico de la infraestructura vial. Se estiman reducciones de hasta el 30 % en emisiones de CO₂ mediante la incorporación de RAP, así como una disminución del 40 % en el uso de agregados naturales con el empleo de RCD. Estas cifras están respaldadas por análisis de ciclo de vida y se alinean con indicadores como el índice de impacto ambiental y la intensidad energética. El uso de estos materiales también contribuye a mitigar problemáticas como la disposición de llantas usadas y el crecimiento descontrolado de botaderos ilegales en zonas urbanas.

12.3. Conclusiones normativas

Aunque el marco normativo colombiano ha mostrado avances como la Resolución 3920 de 2024 del INVÍAS y la NTC 6246:2017 aún no existe una articulación normativa integral y obligatoria para la aplicación sistemática de materiales reciclados. Esta investigación resalta la necesidad de consolidar lineamientos técnicos nacionales que integren el uso de RAP, GCR y

RCD en los procesos de diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos. También se identificó la falta de actualización en especificaciones para tramos rurales y zonas con condiciones climáticas variables, lo cual limita su adopción masiva.

12.4. Conclusiones económicas y sociales

Desde el enfoque económico, el uso de materiales reciclados puede generar ahorros de hasta un 25 % en costos de producción y entre un 15 % y 20 % en mantenimiento, especialmente relevantes en regiones con alta dependencia de agregados transportados desde largas distancias. Socialmente, su implementación promueve empleo local a través de cadenas de reciclaje, fomenta la capacitación técnica y fortalece economías circulares emergentes. En municipios como Villavicencio y Puerto Gaitán, estas tecnologías han comenzado a generar impactos positivos tanto en el desarrollo de capacidades como en la percepción ciudadana sobre la gestión ambiental en obras públicas.

13. Recomendaciones

Con base en los hallazgos técnicos, ambientales y normativos obtenidos, se proponen las siguientes recomendaciones para avanzar en la implementación efectiva de materiales renovables en pavimentos asfálticos en Colombia:

13.1. Actualización normativa y técnica

Revisar y armonizar las especificaciones técnicas del INVÍAS, ICONTEC y pliegos tipo para incorporar criterios sobre contenido máximo de RAP, GCR y RCD, métodos de dosificación, rejuvenecimiento y compatibilidad con mezclas calientes y templadas.

Establecer procedimientos simplificados de evaluación técnica (CBR, módulo resiliente, estabilidad Marshall) aplicables a contextos urbanos y rurales, con rangos de aceptación diferenciados por tráfico, clima y geografía.

13.2. Plan piloto de implementación gradual

Se recomienda adoptar un plan por etapas en colaboración con entes territoriales, diseñado así:

Tabla 10 Plan piloto gradual.

Fase	Actividad principal	Entidad responsable	Plazo estimado
Diagnóstico	Identificación de fuentes locales de RAP/RCD/GCR y análisis de calidad	Alcaldías, universidades, SENA	3 meses
Diseño y dosificación	Formulación de mezclas según normas técnicas (NTC 6246, INV E-744)	Laboratorios, consultores	2 meses
Ejecución piloto	Aplicación de mezcla modificada en 1 km de vía urbana (ejemplo, barrio La Esperanza, Villavicencio)	IMIVI, contratistas	4 meses
Monitoreo y evaluación	Medición de desempeño (CBR, estabilidad, impacto ambiental, costos)	Universidades, IDU	6 meses

13.3. Fortalecimiento institucional y formación

- Establecer convenios entre el SENA, universidades regionales y entes contratantes para capacitar técnicos en tecnologías de reciclaje vial y control de calidad.
- Promover la creación de unidades de economía circular en secretarías de obras públicas para articular recolección, tratamiento y uso de RCD y llantas usadas.

13.4. Escalabilidad y financiamiento

- Diseñar mecanismos de cofinanciación con el Ministerio de Transporte, el DNP y organismos multilaterales para apoyar los pilotos y replicarlos en otros municipios intermedios.
- Incluir criterios ambientales en los procesos de contratación, que los pliegos y licitaciones consideren el uso de materiales reciclados como parte de sus requerimientos técnicos, incentivando su incorporación en proyectos viales.
- Integrar estos proyectos a los lineamientos de infraestructura verde del país y al cumplimiento de metas climáticas del ODS 9, 11 y 13.

14. Bibliografía

- Aguilar-Garavito, M., & Ramírez-Hernández, W. (2016). Fundamentos y consideraciones generales sobre restauración ecológica para Colombia. Biodiversidad en la práctica. Documentos de trabajo del Instituto Humboldt, 1(1), 147–176. <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/BEP/article/view/50>
- Al-Qadi, I., & Elseifi, M. (2007). Mechanistic-empirical design of flexible pavements. Springer.
- Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Satar, M. K. I. M., & Jaya, R. P. (2021). Impacts of maltene on the wettability and adhesion properties of rejuvenated asphalt binder. Arab Journal of Science and Engineering, 46(11), 10557–10568. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05413-0>
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2017). AASHTO M 319: Standard specification for performance-graded asphalt binder. AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2017). AASHTO T 307: Determination of resilient modulus of soils and aggregate materials. AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020). AASHTO T 245: Standard method of test for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus. AASHTO.
- ASTM International. (2020). ASTM D6926-20: Standard practice for preparation of asphalt mixture specimens using Marshall apparatus. ASTM International.
- Barberá Heredia, E. (2004). Perspectiva cognitiva-social: estereotipos y esquemas de género. En Psicología y género (5ª ed., pp. 55–80). Pearson. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=334014>
- Barrios, C., Garzón, M., & Torres, L. (2022). Análisis de ciclo de vida de mezclas asfálticas con GCR. Journal of Cleaner Technologies, 15(2), 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.jclt.2022.02.005>
- Ben, M., David, H., Matthias, B., Cyril, F., & Van den Bergh, W. (2022). On the road again: An economic and environmental break-even and hotspot analysis of reclaimed asphalt pavement and rejuvenators. Resources, Conservation and Recycling, 177, 106014. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106014>

- Buitrago García, V. K., & Paredes, Y. F. (2022). Revisión del uso de RAP en vías terciarias colombianas. [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/45115>
- Buttlar, W. G., Frank, R. J., & Willis, J. R. (2002). New deformations tests and prediction models for flexible pavements. ASCE Press.
- Caputo, P., Damasceno, P. C., Lo Presti, D., Angelone, M., & Dalmazzo, D. (2022). Effect and mechanism of rejuvenation of field-aged bitumen using waste pig fat. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106097. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106097>
- Castro, M. A. (2017). Análisis de métodos de reciclaje en caliente y frío para mezcla asfáltica. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/15283>
- Congreso de la República de Colombia. (2006). Ley 1098 de 2006. Por la cual se expide el Código de la Infancia y la Adolescencia. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1098_2006.html
- Consejo Municipal de Villavicencio. (2002, septiembre 4). Acuerdo No. 021 de 2002. Por el cual se modifica el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio. Consejo Municipal de Villavicencio. <http://curaduria1villavicencio.com.co/normatividad/Acuerdo%20021%20De%202002.pdf>
- Costa, H., & Pereira, A. (2024). Microestructura de mezcla RAP-GCR: Estudio micro-CT. *Materials Characterization*, 198, 112715. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.112715>
- Cuenca Noreña, M. A. (2020). Gestión predial/territorial para la construcción del corredor férreo del Pacífico - Variante Cartago, Valle del Cauca: Estudio caso Hacienda La Holanda. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/26803>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2008, julio 14). Conpes 3533. Bases de un plan de acción para la adecuación del sistema de propiedad intelectual a la competitividad y productividad nacional, 2008–2010. Consejo Nacional de Política Económica y Social. <https://www.ica.gov.co/getattachment/a1be26c2-af09-4635-b885c3fcea7291e4/2008cp3533.aspx>
- Ding, H., Wang, H., Qu, X., Varveri, A., Gao, J., & You, Z. (2021). Towards an understanding of diffusion mechanism of bio-rejuvenators in aged asphalt binder through molecular

- dynamics simulation. *Journal of Cleaner Production*, 299, 126927.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126927>
- European Bitumen Association (Eurobitume). (2020). The bitumen industry: A global perspective. Eurobitume.
- Figueroa, A. S., & Fonseca, E. S. (2020). Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR. *Infraestructura Vial*, 22(39), 20–28.
<https://doi.org/10.15517/iv.v22i39.41205>
- Federal Highway Administration (FHWA). (2018). Reclaimed asphalt pavement in roadways: Best practices guide. FHWA Office of Pavement Technology.
- Garzón Bejarano, J. E. (2022). Uso de grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas. [Tesis de maestría, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional.
<https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/6d38bcdd-7467-4324-ac05-baf0253f372e/content>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2017). NTC 6246: Mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado (GCR). Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2023). NTC 6656: Recuperación de material base reciclado (RAB). Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (s.f.). NTC 6421: Áridos reciclados en concreto hidráulico. Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2000). NTC 4205: Unidades de mampostería de arcilla cocida: Ladrillos y bloques cerámicos. Icontec.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). INV E-733: Gravedad específica y densidad de mezclas asfálticas compactadas. Invias.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). INV E-734: Gravedad específica (bulk) de mezclas asfálticas compactadas. Invias.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). INV E-748: Ensayo de estabilidad y flujo Marshall. Invias.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2024). Resolución 3920 de 2024: Lineamientos para el uso de materiales reciclados en infraestructura vial. Invias.
- Jiang, Q., Liu, W., & Wu, S. (2024). Technological advances and challenges of reclaimed asphalt pavement (RAP) application in road engineering: A bibliometric analysis from 2000 to 2022. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 35519–35552.
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-33635-w>

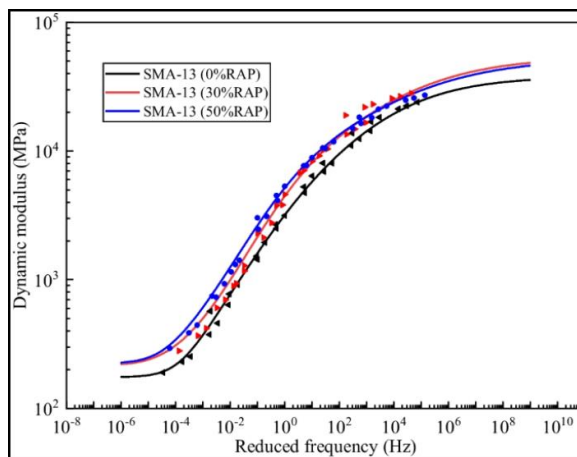
- Lerma González, H. D. (2011). Metodología de la investigación: propuesta, anteproyecto y proyecto (5ª ed.). Ecoe Ediciones. <http://ebooks7-24.com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/?il=3745>
- Londoño, F., Ramírez, J., & Herrera, P. (2022). Módulo resiliente de mezclas con 20 % RAP en condiciones tropicales. *Revista de Ingeniería y Desarrollo*, 14(35), 58–70. <https://doi.org/10.19053/23461407.v14.n35.2022.15549>
- Méndez, A. (2015). Evaluación técnica y económica del uso de RAP en Colombia. [Tesis de maestría, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/c707054c-143b-4d52-8a1b-912ca11ceb3a/content>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. <https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>
- Nguyen, T., & Lee, S. (2022). Warm mix asphalt and recycled aggregate LCA: A comparative study. *Journal of Environmental Management*, 303, 114150. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114150>
- Ortiz-Díaz, J., & Jurado, C. (2021). Caracterización técnico-ambiental de agregados reciclados para subbase. *Revista Ciencia y Tecnología en Ingeniería Civil*, 13(2), 70–84. <https://doi.org/10.15446/rcitic.v13n2.95012>
- Pacheco, L., Martínez, A., & Torres, D. (2017). Incorporación de RCD en capas de subbase de vías urbanas. [Informe técnico], Universidad de Medellín
- Pastás, R. (2021). Estudio y análisis de los procesos de obtención, almacenamiento y uso del material de pavimento asfáltico reciclado en las diferentes obras viales. [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/10495/21785>
- Pérez, A., & Polanía, D. (2021). Evaluación de características mecánicas de una mezcla asfáltica compactada a diferentes temperaturas. *Revista Ingeniería*, 26(1), 45–58. <https://doi.org/10.22458/ing.v26i1.1234>
- Pérez, J., & Mora, C. (2023). Revisión de ciclo de vida en pavimentos con RCD. *Sustainable Infrastructure*, 8(1), 38–52.
- Presidencia de la República de Colombia. (1991). Decreto 2700 de 1991. Por el cual se expiden las normas de procedimiento penal. *Diario Oficial* 40.190. https://normativa.colpensiones.gov.co/colpens/docs/codigo_procedimiento_penal_1991.htm

- Profilio, A., Rossi, A., & Smith, B. (2023). A critical overview of using reclaimed asphalt pavement (RAP) in road infrastructure. *Buildings*, 13(8), 128. <https://doi.org/10.3390/buildings9080128>
- Qiu, G., & Schab, R. (2020). *Life-cycle assessment in pavement engineering*. IWA Publishing.
- Qiu, L., & Zhang, R. (2023). Bibliometric analysis of rejuvenators in RAP. *Environmental Science & Pollution Research*, 30(12), 10254–10267. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25265-5>
- Rek, S., & Wróbel, J. (2023). Effect of grain size on recycled rubber performance in asphalt. *Scielo Chile Journal of Construction Materials*, 31(1), 1–12.
- Reyes, O. D., Troncoso, J., & Camacho, J. (2018). Comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas con cenizas volantes. *Ingeniería y Universidad*, 10(1). 1-18. <https://www.redalyc.org/pdf/477/47710102.pdf>.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D.-Y., & Kennedy, T. W. (1991). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction* (2ª ed.). NAPA Education Foundation.
- Ruiz, M. (2013). Evaluación del impacto ambiental de la producción de mezcla asfáltica en caliente (MDC-2). [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/29603>
- Scherocman, J., & Amirkhanian, S. (2018). *Recycled materials in asphalt and the environment* (Vol. 6). ASTM International.
- Tighe, S. (2017). *Pavement analysis and design*. Pearson Prentice Hall.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2017). *Global environment outlook 6: Infrastructure*. UNEP.
- Universidad Militar Nueva Granada (UMNG). (2023). Evaluación del uso de RAP en vías primarias. UMNG.
- Valencia, J., & Hernández, L. (2023). Pilotaje técnico de RAP en Medellín. [Tesis de especialización]. Universidad de Antioquia
- White, R. J. (2014). *Modern pavement maintenance, preservation, and rehabilitation*. ASTM Press.
- Xu, X., & Zhang, Y. (2020). Comparative life cycle assessment of warm mix asphalt with RCA. *Science of the Total Environment*, 712, 136442. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136442>

Anexos y elementos adicionales

Anexo A Módulo dinámico de mezclas SMA-13 con diferentes contenidos de RAP

Figura 7 Módulo dinámico de mezclas SMA-13 con diferentes contenidos de RAP.



Nota. Se observa la variación del módulo dinámico en función de la frecuencia reducida para mezclas SMA-13 con 0 %, 30 % y 50 % de pavimento asfáltico recuperado (RAP), evidenciando un aumento de rigidez a mayores porcentajes de RAP. Adaptado de Wang, F., Guo, Y., Luo, X., Chen, R., & Zhang, Y. (2019). Investigation of the mechanical properties of recycled aggregate base materials using reclaimed asphalt pavement. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, Article ID 8238904. <https://doi.org/10.1155/2019/8238904>

Anexo B. Fichas técnicas de materiales renovables

Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)

- Origen: Fresado de capas asfálticas antiguas
- Propiedades principales: Contenido de betún envejecido (4–8%), granulometría variable, densidad 2.40–2.55 g/cm³
- Aplicaciones: Capas base, subbase, mezcla reciclada caliente
- Ensayos requeridos: Contenido de asfalto, granulometría, densidad aparente, estabilidad Marshall

Grano de Caucho Reciclado (GCR)

- Origen: Triturado de llantas usadas

- Propiedades principales: Tamaño de partícula 0.5–2 mm, densidad 1.1 g/cm³, contenido de caucho >90%
- Aplicaciones: Mezclas modificadas (vía húmeda o seca)
- Ensayos requeridos: Análisis termogravimétrico, viscosidad del ligante modificado, estabilidad Marshall

Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

- Origen: Concreto triturado, ladrillo, cerámica
- Propiedades principales: Absorción >5%, forma angular, densidad variable (2.1–2.4 g/cm³)
- Aplicaciones: Subbase, agregados en mezcla asfáltica
- Ensayos requeridos: Granulometría, Los Ángeles, CBR, absorción

Anexo C Diagrama de proceso de incorporación de materiales renovables

Etapas comunes para RAP, GCR y RCD:

1. Recolección y acopio del material
2. Triturado/Procesamiento preliminar
3. Clasificación y caracterización
4. Dosificación y diseño de mezcla
5. Incorporación en planta de producción
6. Transporte y colocación en obra
7. Compactación y control de calidad

Anexo D. Cronograma de implementación piloto (18 meses)*Tabla 11 Cronograma plan piloto.*

Fase	Actividad	Meses
I	Recolección de material (RAP, GCR, RCD)	1–3
II	Ensayos de laboratorio y diseño de mezcla	3–5
III	Selección de tramos piloto (Villavicencio)	4–6
IV	Producción y aplicación de mezclas	6–8
V	Seguimiento técnico y ambiental	9–14
VI	Evaluación de resultados y ajustes normativos	15–18

Anexo E. Posibles zonas de aplicación (Meta y Orinoquía)

Criterios de selección:

- Alto tráfico vehicular
- Disponibilidad de residuos (llantas, demolición, fresado)
- Condiciones climáticas diversas

Zonas sugeridas:

- Corredor vial Villavicencio – Granada
- Perímetro urbano de Villavicencio (Barrios Sexta etapa la Esperanza, Porfía, Barzal)
- Vías terciarias en municipios de Acacías, Cumaral, Restrepo

Anexo F. Tabla comparativa técnica de mezclas asfálticas*Tabla 12 Tabla comparativa mezclas asfálticas.*

Tipo de mezcla	Material	Estabilidad Marshall (kN)	Módulo Resiliente (MPa)	Costo estimado (%)
Tradicional	Agregado virgen	10.2	350	100
Con RAP 30%	RAP	10.8	320	88
Con GCR 15%	GCR + agregado	12.4	365	92
Con RCD 25%	RCD + virgen	9.6	300	83