

Análisis teórico de la incorporación de polvillo de llanta y aceite residual de cocina como rejuvenecedores del RAP para su uso en nuevas mezclas asfálticas en caliente dentro del

AMB

Neyder Yessid Reina Chacón

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Vladimir Plata Chávez

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2025

Contenido

Introducción	9
1. Formulación del problema	11
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. Justificación	14
4. Estado del Arte	15
4.1 Pavimentos flexibles	15
4.2. Ligantes asfálticos	16
4.3 Mezclas asfálticas	17
4.4 Mecanismos de daño en mezclas asfálticas	18
4.5 Pavimento asfáltico reciclado (RAP)	19
4.6 Rejuvenecedores	21
4.7 Mezclas asfálticas recicladas	23
5. Metodología	28
6. Resultados	31
6.1 Etapa 1: Determinación la cantidad disponible de WCO y GTR en el Área Metropolitana de Bucaramanga	31
6.2 Etapa 2: Selección de artículos científicos y normativa colombiana de infraestructura vial vigente.	36
6.3 Etapa 3: Identificación de rangos y metodologías para la incorporación de GTR y WCO como rejuvenecedores en el RAP a partir de la revisión de literatura.	39

6.3.1 Efecto del WCO sobre el Asfalto Envejecido del RAP.....	49
6.4 Etapa 4: Análisis del efecto de la composición del GTR y WCO sobre las propiedades del asfalto recuperado del RAP.....	50
6.4.1 Efecto del GTR sobre el Asfalto Envejecido del RAP.....	50
6.4.2 Beneficios Combinados de GTR y WCO.....	52
6.5 Etapa 5: Propuesta de una metodología para la elaboración de mezclas asfálticas usando RAP rejuvenecido con GTR y WCO	53
6.5.1 Diseño de la mezcla asfáltica reciclada	55
7. Conclusiones.....	59
Referencias.....	62

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Cantidades anuales de RSE generados: WCO y llantas usadas</i>	35
Tabla 2. <i>Ecuaciones de búsqueda</i>	37
Tabla 3. <i>Ecuaciones de búsqueda final.....</i>	38
Tabla 4. <i>Condiciones Óptimas para la Incorporación de GTR Pretratado con WCO en Mezclas Asfálticas</i>	48
Tabla 5. <i>Porcentaje Óptimo de WCO en Mezclas Asfálticas.....</i>	49
Tabla 6. <i>Efecto del GTR sobre el asfalto envejecido del RAP.....</i>	50
Tabla 7. <i>Efecto del WCO sobre el asfalto envejecido del RAP.....</i>	51

Lista de figuras

Figura 1. <i>Estructura típica del pavimento flexible</i>	15
Figura 2. <i>Etapas de la metodología</i>	28
Figura 3. <i>Programa y/o gestor posconsumo</i>	33
Figura 4. <i>Punto Limpio Metropolitano – Materiales posconsumo recolectados</i>	34
Figura 5. <i>Caracterización de los residuos sólidos especiales recolectados por tipo de residuo</i>	35
Figura 6. <i>Tipo de asfalto por emplear en mezclas con asfaltos modificados con GTR (Tabla 467-1).</i>	40
Figura 7. <i>Características del GTR (Tabla 413-1)</i>	41
Figura 8. <i>Distribución de tamaños del GTR (Tabla 413-2)</i>	42
Figura 9. <i>Especificaciones para el cemento asfáltico modificado con GTR (Tabla 413-3)</i>	43
Figura 10. <i>Performance-Graded Asphalt Binder Specification (Tabla 1 AASHTO M320-16)</i> ...	44
Figura 11. <i>Franjas granulométricas para mezclas asfálticas con GTR (Tabla 467-2)</i>	45
Figura 12. <i>Tipo de gradación por utilizar en función del tipo y espesor compacto de la capa (Tabla 467-3)</i>	45
Figura 13. <i>Pasos por seguir para el diseño de mezclas asfálticas con GTR (Tabla 467-4)</i>	46
Figura 14. <i>Criterios para el diseño preliminar de mezclas asfálticas con GTR (Tabla 467 – 5)</i>	47
Figura 15. <i>Método de diseño de mezclas</i>	54
Figura 16. <i>Esquema de proceso de mezclas asfálticas recicladas en caliente ARwet</i>	56
Figura 17. <i>Esquema de proceso de mezclas asfálticas recicladas en caliente ARdry</i>	57
Figura 18. <i>Esquema de proceso de mezclas asfálticas recicladas en frio ARdry</i>	58

Resumen

El presente estudio realiza una evaluación teórica del uso combinado de GTR (polvillo de llanta) y WCO (aceite de cocina usado) como agentes para rejuvenecer el Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP). El objetivo es analizar su viabilidad en la producción de mezclas en caliente en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB). El envejecimiento de los pavimentos asfálticos genera la necesidad de mantenimiento, produciendo RAP como residuo. La incorporación de altos porcentajes de RAP (>20%) en nuevas mezclas puede ocasionar problemas de durabilidad debido al asfalto envejecido presente. La investigación se desarrolló en cinco etapas principales. En la primera, se determinó la cantidad disponible de WCO y GTR en el AMB, encontrando que en 2022 se generaron aproximadamente 98,56 toneladas anuales de WCO y 492,82 toneladas anuales de llantas usadas [1]. La segunda etapa consistió en la selección de artículos científicos y normativa colombiana de infraestructura vial vigente. En la tercera etapa, se identificaron rangos y metodologías para la incorporación de GTR y WCO como rejuvenecedores en el RAP. La cuarta etapa analizó el efecto de la composición del GTR y WCO sobre las propiedades del asfalto recuperado del RAP. Finalmente, en la quinta etapa, se propuso una metodología para la elaboración de mezclas asfálticas usando RAP rejuvenecido con GTR y WCO. Los resultados indican que la combinación de GTR y WCO ofrece beneficios sinérgicos, mejorando las propiedades del asfalto envejecido y permitiendo la incorporación de mayores tasas de RAP en nuevas mezclas. Esta alternativa no solo aprovecha residuos que requieren un manejo especial, sino que también reduce el consumo de materiales vírgenes, promoviendo un modelo de economía circular en el sector de la pavimentación.

Palabras clave: pavimento asfáltico reciclado, rejuvenecedor, polvillo de llanta, aceite de cocina residual, mezcla asfáltica en caliente

Abstract

This study presents a theoretical analysis of the incorporation of ground tire rubber (GTR) and waste cooking oil (WCO) as rejuvenators for recycled asphalt pavement (RAP) for use in new hot mix asphalt within the Bucaramanga Metropolitan Area (AMB). The aging of asphalt pavements generates the need for maintenance, producing RAP as a residue. The incorporation of high percentages of RAP (>20%) in new mixtures can cause durability problems due to the aged asphalt present. The research was developed in five main stages. In the first, the available quantity of WCO and GTR in the AMB was determined, finding that in 2022 approximately 98,56 tons of WCO and 492,82 tons of used tires were generated annually. The second stage consisted of selecting scientific articles and current Colombian road infrastructure regulations. In the third stage, ranges and methodologies for incorporating GTR and WCO as rejuvenators in RAP were identified. The fourth stage analyzed the effect of GTR and WCO composition on the properties of asphalt recovered from RAP. Finally, in the fifth stage, a methodology was proposed for the elaboration of asphalt mixtures using RAP rejuvenated with GTR and WCO. The results indicate that the combination of GTR and WCO offers synergistic benefits, improving the properties of aged asphalt and allowing the incorporation of higher rates of RAP in new mixtures. This alternative not only takes advantage of waste that requires special handling, but also reduces the consumption of virgin materials, promoting a circular economy model in the paving sector.

Keywords: recycled asphalt pavement, rejuvenator, ground tire rubber, waste cooking oil, hot mix asphalt

Abreviaciones

RAP: Pavimento Asfáltico Reciclado (Recycled Asphalt Pavement)

GTR: Grano de Caucho Reciclado (Ground Tire Rubber)

WCO: Aceite de Cocina Residual (Waste Cooking Oil)

AMB: Área Metropolitana de Bucaramanga

RTFOT: Prueba de Horno de Película Delgada Rodante (Rolling Thin Film Oven Test)

PAV: Vasija de Envejecimiento a Presión (Pressure Aging Vessel)

VECD: Daño Viscoelástico Continuo (Viscoelastic Continuum Damage)

PG: Grado de Desempeño (Performance Grade)

FM: Microscopía de Fluorescencia (Fluorescence Microscopy)

PGIRS: Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos

ARdry: Proceso en seco

ARwet: Proceso en húmedo

Introducción

La exposición a la intemperie y el paso del tiempo provocan que los pavimentos asfálticos pierdan sus propiedades fisicoquímicas originales. Este desgaste compromete su rendimiento, llevando a la aparición de grietas y deformaciones que impactan negativamente la calidad del servicio vial [2]. Esto hace necesaria la intervención mediante mantenimientos que impliquen la remoción de la carpeta asfáltica deteriorada y su reemplazo por una nueva, trayendo consigo la generación de RAP como residuo. Diversas investigaciones han demostrado que el RAP puede aprovecharse para fabricar nuevas mezclas asfálticas, siendo una técnica económica y ambientalmente rentable [3]. Sin embargo, la implementación de altos porcentajes de RAP (>20%) ocasiona problemas de durabilidad en las mezclas, pues el asfalto envejecido presente en el RAP aporta mayor rigidez y fragilidad, reduciendo la resistencia a fatiga y adherencia del pavimento [2]. Para contrarrestar esto, se ha planteado el uso de rejuvenecedores que restauren las propiedades del asfalto [3]. El WCO ha sido probado como un efectivo rejuvenecedor de las propiedades del asfalto envejecido [2]. Por otra parte, el GTR mejora el desempeño del WCO como rejuvenecedor [2]. El AMB cuenta con un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS que contempla estrategias para el manejo adecuado de diversos tipos de residuos, incluyendo WCO y las llantas desechadas. Dicha labor es gestionada por la misma entidad a través de programas como el Punto Limpio Metropolitano [1]. Este plan busca fomentar la recolección, aprovechamiento y disposición final de estos residuos de manera ambientalmente sostenible, en línea con los principios de la economía circular. Sin embargo, aún existe un potencial significativo para mejorar la gestión de estos residuos y promover su valorización a través de aplicaciones innovadoras. Por lo tanto, surge la oportunidad de utilizar GTR y WCO para rejuvenecer asfalto envejecido y permitir la incorporación de mayores tasas de RAP en nuevas mezclas, promoviendo una economía circular.

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo realizar un análisis teórico sobre la incorporación de GTR y WCO como rejuvenecedores del RAP para su uso en nuevas mezclas asfálticas en caliente dentro del AMB. Específicamente, se buscó determinar la cantidad disponible de llantas desechadas y WCO, proponer una metodología para producir un rejuvenecedor basado en GTR y WCO, y establecer un procedimiento para elaborar mezclas asfálticas en caliente usando RAP rejuvenecido con este compuesto.

La importancia de este estudio radica en que provee una alternativa sostenible para el reciclaje de pavimentos que aprovecha residuos que requieren un manejo especial y reduce el consumo de materiales vírgenes. Esto trae beneficios ambientales al disminuir la explotación de recursos no renovables y la disposición inadecuada de residuos, así como beneficios económicos al reducir costos de materiales y mantenimiento vial. Además, fomenta un modelo de economía circular en el sector de la pavimentación. La investigación se abordó mediante un enfoque teórico, realizando una revisión sistemática de literatura científica y técnica para analizar la viabilidad de utilizar GTR y WCO como rejuvenecedores, y con base en ello proponer metodologías para su incorporación en la producción de mezclas asfálticas recicladas.

El documento se organiza en cinco secciones principales. Luego de esta introducción, se presenta la metodología empleada para la revisión sistemática de literatura. Posteriormente, se muestran los resultados obtenidos en cuanto a disponibilidad de GTR y WCO en el AMB, método propuesto para producir el rejuvenecedor, efecto del rejuvenecedor en las propiedades del asfalto envejecido, y procedimiento para elaborar mezclas asfálticas recicladas. Seguidamente se discuten estos hallazgos contrastándolos con otros estudios. Finalmente, se presentan las conclusiones del análisis teórico.

1. Formulación del problema

El pavimento asfáltico es un tipo de estructura comúnmente usada para la elaboración de carreteras de alto tránsito, debido a que su principal materia prima que es el asfalto tiene propiedades de impermeabilidad, cohesión y plasticidad que permiten un alto rendimiento mecánico y una buena transmisión de la temperatura. Sin embargo, es bien sabido que la acción del tiempo y el intemperismo genera un desgaste que alteran sus condiciones fisicoquímicas iniciales, comprometiendo el pavimento en su faceta plástica, fomentando la aparición de deformaciones y agrietamientos que afectan la calidad en el servicio de una vía. Esta situación hace que sea necesaria la intervención mediante mantenimientos viales, que consisten en la remoción de la carpeta de rodadura para la instalación de una nueva, trayendo consigo la aparición de nuevos costos y la generación de residuos [4].

Varias investigaciones han mostrado que los pavimentos deteriorados se pueden recuperar mediante el proceso de fresado, y el material obtenido se puede usar para fabricar nuevas mezclas asfálticas, siendo esta una técnica económica y medioambiental muy rentable [5]. Este procedimiento aprovecha el material desechado no renovable y genera la utilización de este RAP. A pesar de los beneficios del reciclaje, la literatura técnica advierte que el uso de tasas de RAP superiores al 20% en mezclas en caliente puede causar fallas de durabilidad. El pavimento resultante tiende a perder adherencia y resistencia a la fatiga en un periodo más corto. Esta falla prematura se atribuye a la rigidez excesiva que el ligante asfáltico oxidado, contenido en el RAP, introduce en la nueva mezcla [6]. En función de esto, se comenzó a hablar de la necesidad de implementar rejuvenecedores asfálticos mezclados con el porcentaje de RAP que será adicionado a su contraparte de material virgen. El WCO ha sido probado como un rejuvenecedor de las propiedades bituminosas del RAP. Varios estudios respaldan esta técnica de adicionar aceite

residual de cocina como rejuvenecedor del RAP, para posteriormente conformar nuevas mezclas asfálticas en caliente [7].

En este orden de ideas, hay que tener en cuenta la amplia necesidad de seguir investigando mecanismos para el aprovechamiento de residuos sólidos; esto dentro del marco de los objetivos de desarrollo sostenible y el acuerdo de París [8], donde se busca reducir en una gran medida la emisión de gases de efecto invernadero. Parte de este objetivo se realiza reduciendo la explotación y uso de material virgen. En consecuencia, es pertinente hablar del estudio de, quienes emplean GTR, junto con el WCO, en una reacción química de pre-desulfurización para conformar un rejuvenecedor asfáltico nuevo [4]. La reutilización de llantas usadas en un nuevo proceso, que es de donde proviene el GTR, es un ejemplo de cómo valorizar un residuo desde los conceptos de la economía circular.

Dentro del contexto local, en el área metropolitana de Bucaramanga existen diferentes puntos donde se recolectan varias clases de residuos; dentro de ese grupo se encuentran las llantas usadas. Estas llantas principalmente se trituran para obtener GTR [1]. Sin embargo, no se ha designado un plan completo para su gestión amplia, manejo y reciclaje. En consecuencia, no existen empresas licenciadas en el reciclaje de llantas, así como tampoco existen plantas para su reciclaje, por lo que muchas de estas llantas son comercializadas en mercados informales o simplemente pasan a ser escombros. Específicamente esta última situación deriva en problemáticas ambientales contempladas en la resolución 1326 de 2017 [9], donde se prohíbe el abandono o eliminación de llantas usadas en el territorio nacional, su enterramiento, su disposición en rellenos sanitarios, su acumulación a cielo abierto, su abandono en espacio público, su quema y su utilización como combustible debido al impacto ambiental que genera el mal manejo del residuo.

Teniendo en cuenta lo anterior se evidencia la necesidad y oportunidad de aprovechar este residuo, particularmente como GTR, pues su implementación dentro del proceso de reciclado de asfalto hace que se valore, acorde con los principios de una economía circular. Asimismo, la presencia del GTR mejora el desempeño del WCO como rejuvenecedor de asfalto reciclado. Se ha propuesto incorporar directamente el GTR y también modificarlo químicamente antes de su incorporación, por lo que se ve la necesidad de realizar un análisis teórico de la incorporación de GTR y aceite residual de cocina como rejuvenecedores del RAP para su uso en mezclas asfálticas dentro del AMB.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar un análisis teórico de la incorporación de polvillo de llanta y aceite residual de cocina como rejuvenecedores del RAP para su uso en nuevas mezclas asfálticas en caliente dentro del AMB.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad disponible de llantas desechadas y aceite residual en el AMB.
- Proponer una metodología para la producción de un rejuvenecedor basado en el polvillo de llanta y el aceite residual de cocina.
- Proponer una metodología para la elaboración de mezclas asfálticas usando RAP rejuvenecido con polvillo de llanta y aceite de cocina residual.

3. Justificación

Con el presente proyecto se busca evaluar la factibilidad de rejuvenecer el asfalto contenido en el RAP mediante el uso de GTR y WCO con el fin de elaborar nuevas mezclas asfálticas en caliente. La incorporación de estos residuos mitiga el impacto ambiental que pueden generar cuando son depositados en las escombreras o se les da un mal manejo. Las llantas usadas y el WCO son de los mayores contaminantes de las fuentes hídricas, ya que sus componentes degradan las propiedades del fluido o incluso generan sedimentos, que pueden afectar la salud de los organismos que la consuman o un sobre costo en su tratamiento [10]. Un diseño metodológico adecuado para el uso de estos residuos permitiría reciclar una porción de lo que se genere dentro del AMB; de la misma manera, esta investigación permitirá la creación de nuevas mezclas asfálticas sostenibles, puesto que requieren de una menor cantidad de material virgen, implicando una reducción en el costo medioambiental en su producción.

En este orden de ideas, también se debe señalar que la incorporación de estos materiales mitiga el impacto causado por la preparación tradicional de mezclas asfálticas debido a que se reduce el uso de materiales vírgenes y se reutilizan unos residuos que generan daños en los ecosistemas donde son desechados. Simultáneamente, se obtiene un producto que contiene un porcentaje de estos residuos, sin que se afecte significativamente el rendimiento de las mezclas asfálticas. Lo anterior abre la posibilidad de suplir las necesidades de transporte del AMB, mediante pavimentos que presten un excelente servicio y sean más económicos y ambientalmente sostenibles.

4. Estado del Arte

4.1 Pavimentos flexibles

Para proveer una superficie de rodadura cómoda y segura, los pavimentos flexibles se diseñan como una estructura de múltiples capas sobre la subrasante, cuya finalidad es distribuir eficientemente las cargas vehiculares [2].

Un pavimento flexible está compuesto por una estructura de varias capas construidas sobre el terreno natural o subrasante. Tal como se ilustra en la Figura 1, dicha estructura se conforma típicamente por: la carpeta asfáltica, que sirve como superficie de rodadura impermeable; la base, que distribuye las cargas del tránsito; la subbase, que ayuda al drenaje; y la subrasante, que soporta toda la estructura.

Figura 1. *Estructura típica del pavimento flexible*



Adaptado de [11].

Los pavimentos flexibles ofrecen ventajas como una superficie de rodadura suave, facilidad de reparación y un costo inicial menor en comparación con los pavimentos rígidos. Sin embargo, también presentan desventajas como una vida de servicio más corta y mayor susceptibilidad al ahuellamiento y agrietamiento por fatiga [4].

4.2. Ligantes asfálticos

El ligante asfáltico es el componente termoplástico que aglutina a los agregados pétreos. Su rol es crítico para dar cohesión, resistencia e impermeabilidad a la mezcla [3].

Las principales propiedades de los ligantes asfálticos incluyen la consistencia, la adhesión y la durabilidad. Estas propiedades permiten que el ligante cumpla funciones como unir los agregados, impermeabilizar la mezcla, resistir la acción del agua y contribuir a la resistencia a la deformación permanente y a la fatiga [4].

Los tipos de ligantes asfálticos comúnmente utilizados en mezclas asfálticas incluyen los cementos asfálticos, las emulsiones asfálticas y los asfaltos modificados con polímeros. La selección del tipo de ligante depende de factores como las condiciones climáticas, el volumen de tráfico y el tipo de mezcla asfáltica a producir [2].

Tipos de ligantes.

- Cementos asfálticos
- Mezclas asfálticas en caliente
- Mezclas asfálticas en frío
- Emulsiones asfálticas
- Tratamientos superficiales
- Lechadas asfálticas

4.3 Mezclas asfálticas

Una mezcla asfáltica es un material compuesto que resulta de la combinación de un ligante asfáltico con agregados pétreos. Su diseño busca crear una superficie durable que resista la fatiga y la deformación [3].

Las principales propiedades de las mezclas asfálticas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la trabajabilidad, la resistencia a la fatiga, la resistencia al deslizamiento y la impermeabilidad. Estas propiedades dependen de factores como la granulometría de los agregados, el tipo y contenido de ligante asfáltico y el diseño de la mezcla [2].

Existen diversos tipos de mezclas asfálticas, cada una con características y aplicaciones específicas. Algunos ejemplos incluyen:

- *Mezclas densas*: poseen una granulometría continua y un bajo contenido de vacíos, lo que las hace resistentes a la deformación permanente [2].
- *Mezclas abiertas*: tienen una granulometría discontinua con un alto contenido de vacíos, lo que mejora la permeabilidad y reduce el hidroplaneo el cual es un fenómeno que ocurre cuando una película de agua se acumula entre los neumáticos y la superficie del pavimento, provocando una pérdida de tracción y control del vehículo [4].
- *Mezclas discontinuas*: presentan una granulometría con interrupciones en ciertos tamaños de agregado, lo que aumenta la resistencia a la deformación y mejora la macrotextura superficial. Esta última se refiere a las irregularidades superficiales del pavimento a una escala mayor, típicamente en el rango de 0,5 a 50 mm. Estas irregularidades son creadas por la disposición y el tamaño de los agregados en la superficie del pavimento. [3].
- *Mezclas drenantes*: diseñadas con un alto contenido de vacíos interconectados para permitir el drenaje rápido del agua superficial [2].

4.4 Mecanismos de daño en mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas están sujetas a diversos mecanismos de daño que pueden afectar su desempeño y durabilidad a lo largo del tiempo. Estos mecanismos están relacionados con factores como las cargas del tráfico, las condiciones ambientales y las propiedades de los materiales [4]. A continuación, se describen los principales mecanismos de daño en las mezclas asfálticas.

El agrietamiento por fatiga es uno de los mecanismos de daño más comunes en las mezclas asfálticas. Se produce debido a la repetición de cargas cíclicas del tráfico, que generan esfuerzos de tracción en la parte inferior de la capa asfáltica [2]. Con el tiempo, estos esfuerzos provocan la iniciación y propagación de grietas, lo que reduce la capacidad estructural del pavimento y compromete su integridad [3].

La deformación permanente, también conocida como ahuellamiento, es otro mecanismo de daño crítico en las mezclas asfálticas. Se manifiesta como una depresión longitudinal en la huella de las ruedas de los vehículos [4]. El ahuellamiento se produce por la acumulación de deformaciones plásticas en la mezcla asfáltica debido a las cargas repetitivas del tráfico y a las altas temperaturas [2]. Este mecanismo de daño puede comprometer la seguridad y el confort de los usuarios, además de acelerar el deterioro del pavimento.

El daño por humedad es un mecanismo que afecta la durabilidad de las mezclas asfálticas. Se produce cuando el agua penetra en la estructura del pavimento y debilita la adherencia entre el agregado y el ligante asfáltico [3]. Esto puede provocar desprendimientos, pérdida de cohesión y reducción de la resistencia de la mezcla [4]. El daño por humedad puede acelerar otros mecanismos de daño, como el agrietamiento por fatiga y la deformación permanente.

El envejecimiento del ligante asfáltico es un proceso gradual que ocurre durante la vida útil del pavimento. Se produce por la exposición del ligante a factores como el oxígeno, la radiación ultravioleta y los cambios de temperatura [2]. El envejecimiento provoca un endurecimiento y fragilización del ligante, lo que reduce su capacidad para resistir los esfuerzos y deformaciones [3]. Esto puede conducir a un aumento de la rigidez de la mezcla asfáltica y a una mayor susceptibilidad al agrietamiento.

4.5 Pavimento asfáltico reciclado (RAP)

El RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) se define como el material que se obtiene tras procesar y recuperar pavimentos que han llegado al final de su vida útil [3]. El uso de RAP en la construcción de nuevos pavimentos o en la rehabilitación de los existentes se ha vuelto cada vez más común debido a sus beneficios económicos y ambientales [4].

El RAP se define como el material resultante de la trituración y procesamiento de capas asfálticas envejecidas o deterioradas, que se utiliza como materia prima para la producción de nuevas mezclas asfálticas [2]. Este material está compuesto por agregados pétreos y ligante asfáltico envejecido, y puede ser utilizado en diversos porcentajes en la fabricación de mezclas asfálticas recicladas [3].

El proceso de obtención del RAP implica varias etapas. En primer lugar, se realiza la extracción del pavimento asfáltico envejecido mediante técnicas como el fresado o la demolición. Luego, el material extraído se transporta a una planta de procesamiento, donde se tritura y se clasifica por tamaños. Durante este proceso, se pueden eliminar materiales contaminantes y se puede ajustar la granulometría del RAP para cumplir con los requisitos específicos de la mezcla asfáltica a producir [3].

El uso de RAP en la producción de mezclas asfálticas presenta varias ventajas, tanto económicas como ambientales. Algunas de estas ventajas incluyen:

Reducción de costos: el uso de RAP permite disminuir la cantidad de materiales vírgenes necesarios, lo que se traduce en un ahorro significativo en los costos de producción [4].

Conservación de recursos naturales: al reutilizar el pavimento asfáltico envejecido, se reduce la demanda de agregados vírgenes y ligantes asfálticos, lo que contribuye a la conservación de los recursos naturales [2].

Disminución de emisiones: el reciclaje de pavimentos asfálticos reduce las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la extracción, producción y transporte de materiales vírgenes [3].

Mejora de las propiedades mecánicas: Cuando se utiliza en proporciones adecuadas y con un diseño apropiado, el RAP puede mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, como la resistencia a la deformación permanente y la resistencia a la fatiga [4].

A pesar de sus beneficios, el uso de RAP también presenta algunas desventajas que deben ser consideradas:

Variabilidad de las propiedades: las propiedades del RAP pueden variar significativamente dependiendo de su origen, edad y condición, lo que puede afectar la consistencia y el desempeño de las mezclas asfálticas producidas [2].

Envejecimiento del ligante: el ligante asfáltico presente en el RAP está envejecido y puede ser más rígido y frágil que el ligante virgen, lo que puede limitar el porcentaje de RAP que se puede utilizar en las mezclas sin comprometer su desempeño [3].

Necesidad de caracterización y control de calidad: para garantizar un uso efectivo del RAP, es necesario realizar una caracterización adecuada de sus propiedades y establecer controles de calidad rigurosos durante el proceso de producción de las mezclas asfálticas [4].

4.6 Rejuvenecedores

Para contrarrestar el envejecimiento del ligante en el RAP, se emplean aditivos conocidos como rejuvenecedores. Estos tienen el objetivo de ablandar dicho ligante para mejorar la trabajabilidad y el desempeño de la mezcla reciclada [4].

Los rejuvenecedores se definen como productos químicos o materiales que se añaden al RAP o a las mezclas asfálticas recicladas para restaurar las propiedades del ligante asfáltico envejecido y mejorar el desempeño general de la mezcla [2]. Estos aditivos actúan sobre el ligante envejecido, ablandándolo y restaurando sus propiedades reológicas y químicas [2].

Existe una variedad de rejuvenecedores disponibles en el mercado, cada uno con características y mecanismos de acción específicos. Algunos de los tipos más comunes de rejuvenecedores incluyen:

- *Aceites de base biológica:* estos rejuvenecedores se derivan de fuentes renovables, como aceites vegetales o grasas animales. Son biodegradables y tienen un menor impacto ambiental en comparación con los rejuvenecedores a base de petróleo [4].
- *Aceites de base petroquímica:* estos rejuvenecedores se obtienen a partir de la refinación del petróleo y contienen una mezcla de hidrocarburos aromáticos y alifáticos. Son efectivos para ablandar el ligante envejecido y mejorar la trabajabilidad de las mezclas [2].

- *Emulsiones rejuvenecedoras:* estos rejuvenecedores se presentan en forma de emulsiones acuosas que contienen agentes rejuvenecedores dispersos en una fase acuosa. Son fáciles de aplicar y se utilizan comúnmente en técnicas de reciclaje en frío [3].
- *Rejuvenecedores con aditivos modificadores:* algunos rejuvenecedores contienen aditivos modificadores, como polímeros o agentes antioxidantes, que mejoran aún más el desempeño y la durabilidad de las mezclas asfálticas recicladas [3].

Los rejuvenecedores tienen varios efectos beneficiosos sobre el ligante asfáltico envejecido y las mezclas asfálticas recicladas. Algunos de estos efectos incluyen:

Ablandamiento del ligante: los rejuvenecedores reducen la viscosidad y rigidez del ligante envejecido, haciéndolo más trabajable y mejorando la capacidad de la mezcla para resistir la deformación y el agrietamiento [2].

Restauración de propiedades químicas: los rejuvenecedores pueden restaurar la composición química del ligante envejecido, reponiendo los componentes volátiles y los asfaltenos que se pierden durante el envejecimiento [4].

Mejora de la adhesión: algunos rejuvenecedores contienen agentes mejoradores de la adhesión que promueven una mejor unión entre el agregado y el ligante, reduciendo así la susceptibilidad al daño por humedad [4].

Aumento de la durabilidad: al restaurar las propiedades del ligante y mejorar el desempeño general de la mezcla, los rejuvenecedores pueden extender la vida útil de los pavimentos asfálticos reciclados y reducir la necesidad de mantenimiento frecuente [3].

Para lograr los beneficios esperados de los rejuvenecedores, es importante tener en cuenta varias consideraciones de diseño y aplicación:

Dosificación: la cantidad adecuada de rejuvenecedor debe ser determinada mediante ensayos de laboratorio y diseño de mezclas, teniendo en cuenta factores como el tipo y porcentaje de RAP utilizado, las propiedades del ligante envejecido y las condiciones climáticas y de tráfico esperadas [3].

Compatibilidad: es fundamental garantizar la compatibilidad entre el rejuvenecedor y el ligante envejecido, así como con los agregados y otros aditivos utilizados en la mezcla asfáltica reciclada [3].

Método de aplicación: los rejuvenecedores pueden ser aplicados directamente al RAP antes de la mezcla, o pueden ser incorporados durante el proceso de mezclado en planta. El método de aplicación dependerá del tipo de rejuvenecedor y del proceso de reciclaje utilizado [4].

Control de calidad: es esencial establecer un riguroso control de calidad durante la producción y aplicación de las mezclas asfálticas recicladas con rejuvenecedores, para garantizar la consistencia y el desempeño adecuado del pavimento [2].

4.7 Mezclas asfálticas recicladas

En los últimos años, el uso de mezclas asfálticas recicladas ha ganado popularidad como una alternativa sostenible y económica a las mezclas convencionales. Estas mezclas incorporan RAP, reduciendo así la necesidad de nuevos materiales y minimizando el impacto ambiental. A continuación, se analizarán las diferentes mezclas asfálticas recicladas mencionadas en los artículos proporcionados y en la tesis "Mezclas Asfálticas Recicladas en Frío para Optimizar Costos en Pavimentos de Bajo Volumen de Tránsito", junto con sus ventajas, desventajas y la influencia de los rejuvenecedores.

Mezclas Asfálticas Recicladas en Frío

Las mezclas asfálticas recicladas en frío también han demostrado ser una opción viable para la incorporación de RAP. Estas mezclas se producen a temperatura ambiente, lo que reduce el consumo de energía y las emisiones.

En la tesis "Mezclas Asfálticas Recicladas en Frío para Optimizar Costos en Pavimentos de Bajo Volumen de Tránsito", se menciona que las mezclas asfálticas recicladas en frío se producen a temperaturas ambiente, y pueden incorporar hasta un 100% de RAP [2]. Además, se indica que para una mezcla asfáltica reciclada en frío con 100% de RAP y emulsión asfáltica, el contenido de vacíos puede variar entre 10% y 15% [2], este tipo de mezclas normalmente debe ser acompañada por cemento portland, debido a que sus propiedades físicas al ser meramente compactado y mezclado con emulsión asfáltica sin un proceso calórico, puede llegar a necesitar las propiedades del cemento portland para cumplir las normativas de control para bajos volúmenes de tráfico.

Ventajas:

- Menor consumo de energía y emisiones
- Posibilidad de incorporar altos porcentajes de RAP (hasta 100%)
- Temperaturas ambientes de producción

Desventajas:

- Propiedades mecánicas inferiores a las mezclas en caliente
- Tiempo de curado más largo

Mezclas Asfálticas Recicladas Tibias

“Las mezclas asfálticas recicladas tibias se producen a temperaturas intermedias entre las mezclas en caliente y en frío, típicamente entre 100°C y 140°C” [2, p.6]. Esto permite una mejor

trabajabilidad y compactación en comparación con las mezclas en frío, al mismo tiempo que se reducen las emisiones y el consumo de energía en comparación con las mezclas en caliente.

Picado-Santos et al. [2] sugieren que las mezclas asfálticas tibias recicladas pueden incorporar entre 30% y 60% de RAP, junto con GTR (10-20% por peso de ligante) y cera orgánica [2].

En cuanto al contenido de vacíos, las mezclas asfálticas tibias recicladas con GTR pueden tener un contenido de vacíos similar al de las mezclas en caliente, alrededor del 4% [2].

Ventajas:

- Mejor trabajabilidad y compactación que las mezclas en frío
- Reducción de emisiones y consumo de energía en comparación con las mezclas en caliente
- Posibilidad de incorporar altos porcentajes de RAP (hasta 60%)

Desventajas:

- Propiedades mecánicas ligeramente inferiores a las mezclas en caliente
- Requiere aditivos especiales (cera orgánica)

Mezclas Asfálticas Recicladas en Caliente

Las mezclas asfálticas recicladas en caliente son una técnica prometedora para la reutilización del RAP. Según Picado-Santos et al. [2], el reciclaje en caliente en planta parece ser la técnica de procesamiento con mayor potencial [81]. Un proyecto local llevado a cabo en la ciudad de Los Ángeles [83] tuvo resultados exitosos en el reciclaje de un asfalto de caucho de 12 años. Los resultados de varios estudios sobre el GTR han demostrado que las propiedades mecánicas de las mezclas envejecidas recicladas son satisfactorias [84,85].

Crockford et al. [86] mencionaron que, a pesar de que el reciclaje convencional de mezclas de asfalto con GTR generalmente requiere temperaturas de mezcla superiores a 160 °C, la cantidad permitida de RAP para ser incorporada en el proceso es relativamente baja (hasta 30%) [2].

En cuanto al porcentaje de vacíos, Picado-Santos et al. [2] mencionan que las mezclas asfálticas recicladas en caliente con RAP pueden tener un contenido de vacíos del 4% al 5% cuando se utilizan mezclas de gradación discontinua (gap-graded) con un contenido de ligante del 6% al 8% [2].

Ventajas:

- Reutilización efectiva del RAP
- Propiedades mecánicas satisfactorias
- Reducción del uso de nuevos materiales

Desventajas:

- Altas temperaturas de mezcla (>160°C)
- Limitación en el porcentaje de RAP (hasta 30%)

Aplicación de Rejuvenecedores

Los rejuvenecedores son aditivos que se utilizan para restaurar las propiedades del ligante asfáltico envejecido presente en el RAP. Estos pueden ser aceites de base biológica, como el WCO, o polímeros, como el GTR.

Según los estudios mencionados, los rejuvenecedores deben aplicarse en proporciones adecuadas para lograr un equilibrio entre la restauración de las propiedades del ligante y la estabilidad de la mezcla. Los porcentajes exactos dependen del tipo de rejuvenecedor y del porcentaje de RAP utilizado.

En el caso del WCO, Xu et al. [4] sugieren que el contenido óptimo de WCO es del 4-6% por peso de ligante para mezclas con 100% de RAP [4]. Por otro lado, Picado-Santos et al. [2] mencionan el uso de 10-20% de GTR por peso de ligante en mezclas asfálticas tibias recicladas con altos porcentajes de RAP (por encima de 60%) [4].

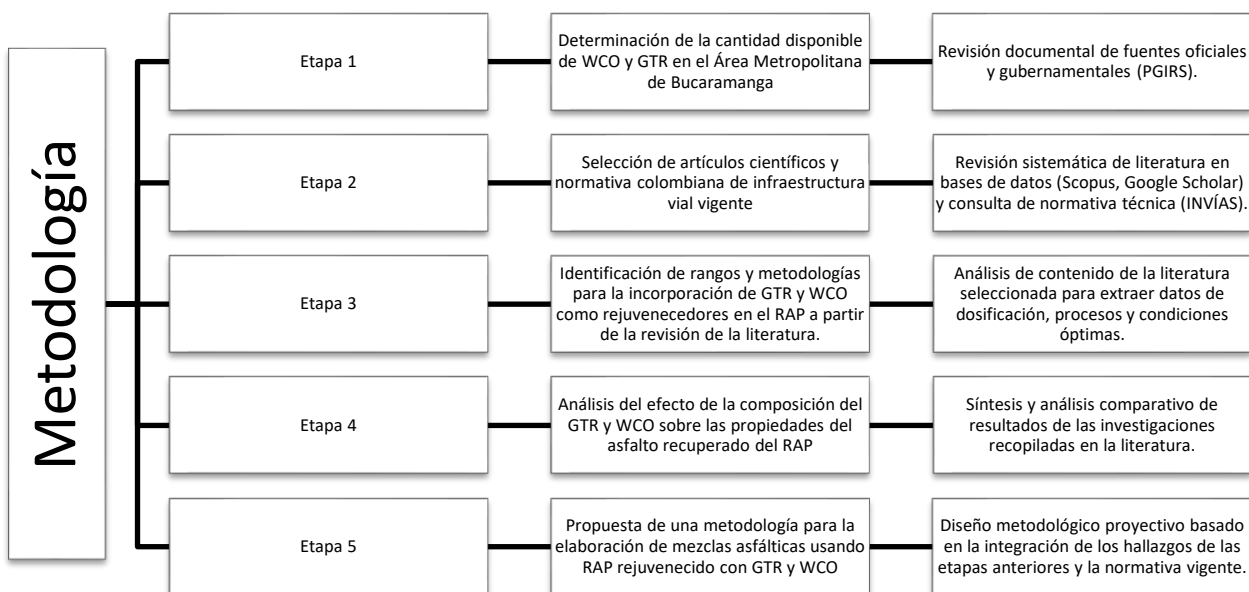
Además de los rejuvenecedores, otros factores que pueden afectar el rendimiento de las mezclas asfálticas recicladas incluyen el tipo y la calidad del RAP, la gradación de los agregados, el tipo de ligante y las condiciones climáticas [2].

En conclusión, las mezclas asfálticas recicladas en caliente, frío y tibias ofrecen diferentes ventajas y desventajas en términos de propiedades mecánicas, consumo de energía, emisiones y porcentaje de RAP utilizado. La elección de la técnica de reciclaje dependerá de las condiciones específicas del proyecto y los objetivos de sostenibilidad. Los rejuvenecedores, como el WCO y el GTR, desempeñan un papel crucial en la restauración de las propiedades del ligante envejecido, pero deben aplicarse en proporciones adecuadas para garantizar el rendimiento óptimo de la mezcla. Además, otros factores como el tipo de RAP, la gradación de los agregados y las condiciones climáticas también influyen en el comportamiento de las mezclas asfálticas recicladas.

5. Metodología

Para desarrollar este análisis teórico sobre la incorporación de GTR y WCO como rejuvenecedores del RAP, se empleó una metodología de tipo explicativa, descriptiva, analítica y proyectiva. Esta se conformó por cinco etapas principales, las cuales se resumen en la Figura 2 y se describen a continuación.

Figura 2. Etapas de la metodología



Etapa 1: Determinación la cantidad disponible de WCO y GTR en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

En esta etapa se realizó una investigación sobre la cantidad de llantas desechadas y WCO generados en el Área Metropolitana de Bucaramanga. La primera fase consistió en una cuantificación documental de los volúmenes de WCO y llantas usadas disponibles en la región. Como fuente primaria se utilizó el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de la

Alcaldía de Bucaramanga, que reporta datos para el ciclo 2022-2023. Esta información se complementó con datos de gestores privados como Grasecol y Ecolecuá, que operan iniciativas como el "Punto Limpio Metropolitano". Para contextualizar la generación de llantas, se examinó el crecimiento del parque automotor usando estadísticas del RUNT, que evidencia un aumento de 758,000 vehículos en 2021 a más de 890,000 a finales de 2023.

Este incremento, especialmente en motocicletas, se correlaciona directamente con la mayor disponibilidad de llantas como residuo y refuerza la pertinencia de buscarles un uso alternativo como el que se propone en este estudio. El objetivo fue establecer la disponibilidad de materia prima para la producción de GTR y WCO como rejuvenecedores.

Etapas 2: Selección de artículos científicos y normativa colombiana de infraestructura vial vigente.

La segunda fase fue una revisión sistemática. Se emplearon las bases de datos Scopus y Google Scholar, además del repositorio del INVÍAS, para localizar estudios sobre la caracterización, interacción y desempeño de estos materiales en mezclas asfálticas. El proceso de filtrado y depuración de los resultados arrojó una muestra final de 38 publicaciones. De forma paralela, se analizó la normativa nacional pertinente del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), enfocándose en las Especificaciones Generales de Construcción (Capítulo "Pavimentos Asfálticos", Art. 413, 461 y 467) y el Manual de Normas de Ensayo, que rigen el uso de RAP y GTR.

Etapas 3: Identificación de rangos y metodologías para la incorporación de GTR y WCO como rejuvenecedores en el RAP a partir de la revisión de literatura.

A partir de la revisión de literatura, se identificaron los rangos típicos de dosificación de GTR y WCO utilizados como rejuvenecedores en mezclas con RAP; las fuentes principales para

establecer dichos rangos fueron las especificaciones del INVIAS [12] y los hallazgos de autores como Xu et al. [4] y Picado-Santos et al. [2]. Con esta base, se analizaron las metodologías empleadas para su incorporación, considerando aspectos como la forma de adicionar estos materiales (vía húmeda o seca), las temperaturas y tiempos de mezcla, y los equipos requeridos. Se buscó establecer las condiciones óptimas para lograr una adecuada interacción entre el GTR, el WCO y el asfalto envejecido del RAP.

Etapas 4: Análisis del efecto de la composición del GTR y WCO sobre las propiedades del asfalto recuperado del RAP.

La cuarta fase consistió en una síntesis comparativa de los hallazgos de la literatura científica. Se examinó cómo la composición fisicoquímica del GTR y el WCO impactan las propiedades del asfalto contenido en el RAP. El análisis se centró en la revisión de parámetros reportados por otros autores, tales como la penetración, el punto de ablandamiento, la viscosidad, la compatibilidad con el ligante y la resistencia al envejecimiento. Se buscó comprender los mecanismos de rejuvenecimiento del GTR y el WCO, y cómo estos influyen en la restauración de las propiedades del asfalto envejecido, basándose en el análisis de la literatura científica, particularmente en trabajos de revisión como el de Xu et al. [4] y estudios específicos sobre la interacción de los materiales como los de Dong et al. [12] y Ma et al. [13].

Etapas 5: Propuesta de metodología para la elaboración de mezclas asfálticas usando RAP rejuvenecido con GTR y WCO.

Con base en los resultados de las etapas anteriores, Se propuso una metodología fundamentada en un diseño metodológico proyectivo, el cual integra los hallazgos de la revisión de literatura y se adapta a los procedimientos establecidos en la normativa colombiana del INVIAS, como el método Marshall. Se establecieron las proporciones adecuadas de cada

componente, considerando la disponibilidad de materiales en el AMB y las propiedades deseadas para las mezclas. Se definieron los procesos de preparación, mezclado y compactación siguiendo las Especificaciones Generales de Construcción del INVÍAS. Asimismo, se establecieron los ensayos de caracterización necesarios para evaluar el desempeño de la mezcla, los cuales se rigen por el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Estos incluyen pruebas clave como el diseño de la mezcla por el método Marshall (INV E-748), la determinación de la estabilidad y el flujo (INV E-824), el análisis de las propiedades volumétricas (INV E-799) y la evaluación de las características del ligante modificado, como la penetración (INV E-706) y el punto de ablandamiento (INV E-712). Esta metodología busca aprovechar de manera eficiente Las llantas recicladas y WCO, a la vez que se obtienen mezclas asfálticas con propiedades similares o superiores a las convencionales.

6. Resultados

6.1 Etapa 1: Determinación la cantidad disponible de WCO y GTR en el Área Metropolitana de Bucaramanga

La revisión sistemática de la literatura se realizó mediante una búsqueda en fuentes de información locales y gubernamentales, siendo la principal el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) [1]. que permitieron conocer la cifra de llantas desechadas y WCO disponibles en el área metropolitana de Bucaramanga en el periodo actual registrado por el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), es decir 2022-2023. De acuerdo con la definición dada por el PGIRS, tanto el WCO como las llantas desechadas entran dentro de los residuos denominados “Sólidos especiales”.

El Decreto 1077 de 2015, en su artículo 2.3.2.1.1, define legalmente un residuo especial como "todo residuo sólido que, por su naturaleza, composición, tamaño, volumen y peso... no puede ser recolectado, manejado, tratado o dispuesto normalmente por la persona prestadora del servicio público de aseo" [1].

Las autoridades ambientales nacionales, a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, han impulsado como iniciativa estratégica la implementación de programas para el manejo de residuos posconsumo. Esta propuesta tiene como finalidad establecer mecanismos diferenciales para la gestión de desechos especiales, evitando su mezcla con desperdicios comunes.

En consonancia con estas directrices nacionales, los gobiernos municipales han implementado diversas iniciativas para reducir la cantidad de estos materiales que terminan en los vertederos. Desde 2016, la ciudadanía cuenta con un espacio específico conocido como "Punto Limpio Metropolitano", instalación que facilita la entrega voluntaria de diversos elementos como dispositivos de iluminación, acumuladores eléctricos, fármacos caducados y equipos tecnológicos en desuso (RAEE).

A finales de 2020, específicamente en noviembre, se ejecutó la decimosegunda campaña de acopio de estos materiales especiales en la región santandereana. Esta actividad contó con la participación de múltiples operadores autorizados para la gestión de residuos posconsumo, entre ellos: Cierra el ciclo, EcoCómputo, Lúmina, Pilas con el Ambiente, Recoenergy, Recopila, Red Verde, Aproveet, Campo Limpio y Grasecol [1]. Para facilitar la gestión de estos materiales, cada tipo de residuo posconsumo es manejado por un gestor o programa específico, autorizado y monitoreado por la Alcaldía. La figura 3 detalla estos programas, especificando la normativa que los rige, así como los tipos de residuos que reciben y los que no.

Figura 3. Programa y/o gestor posconsumo

PROGRAMA Y/O GESTOR POSCONSUMO		NORMATIVIDAD APLICABLE	RESIDUOS QUE RECIBEN	RESIDUOS QUE NO RECIBEN
RAEE (POLÍTICA NACIONAL, 2017)			Medicamentos de uso veterinario vencidos, consumidos parcialmente y sus envases, empaques y embalajes	•Vacunas y bilógicos •Plaguicidas veterinarios (antipulgas)
		Decreto 4741 de 2005 Resolución 1675 de 2013	Envases y empaques vacíos con triple lavado de plaguicidas de uso agropecuario	Bombas de fumigación Trajes de protección EPP
		Decreto 4741 de 2005 Resolución 0372 de 2009	Todo tipo de baterías que sean únicamente plomo ácido. • Vehículos y Motos • Ups, Industriales	• Baterías de equipos médicos • Ácido de batería solo
		Ley 1672 de 2013 Decreto 284 de 2018 Resolución 1512 de 2010 (Computadores y periféricos)	• Computadores, portátiles y tabletas • Pantallas y CPU • Teclados y mouse • Impresoras y escáneres • Discos duros, unidades DVD – CD externas • Cableado del PC • Memorias USB	• Toners, cartuchos y tintas. • Teléfonos, celulares. • CDs • Equipos de audio y video • Electrodomésticos pequeños. • Equipos médicos
		Ley 1672 de 2013 Decreto 284 de 2018 Resolución 1511 de 2010	• Tubos fluorescentes • Bombillas compactas integradas y no integradas • HID (Alumbrado Público)	• Bombillas incandescentes • Halógenos • Balastos • Controles de iluminación, tomas y termómetros
OTROS RESIDUOS		Ley 1672 de 2013 Decreto 284 de 2018 Resolución 1297 de 2010	• Pilas: AA, AAA, D, C, Cuadradas de 6v y 9v • Pilas de botón. • Baterías de celulares y de computadores portátiles.	• Baterías de equipos médicos, vehículos híbridos o baterías industriales
		Ley 1672 de 2013 Decreto 284 de 2018	• Hornos microondas • Lavadoras • Aires acondicionados • Neveras y/o congeladores domésticos	• Ventiladores • Equipos médicos • Equipos contaminados • Otros electrodomésticos no mencionados.
		Resolución 1326 de 2017	• Llantas de Automotor, Camionetas, Buses, Busetas, Volquetas y Tractomulas Rin 13 hasta 22,5.	
		Resolución 0316 de 2018	• Aceite vegetal usado (palma, girasol y Soya) • Grasa pura de tocineta.	• Aceite de motor • Aceite con contenido de agua

Adaptado de [1].

El principal sitio disponible para la recolección de los residuos posconsumo es el Punto Limpio Metropolitano, ubicado en la Ciudadela Real de Minas y operado por el Área Metropolitana de Bucaramanga. La Figura 4 ilustra la fachada de esta instalación, mostrando la

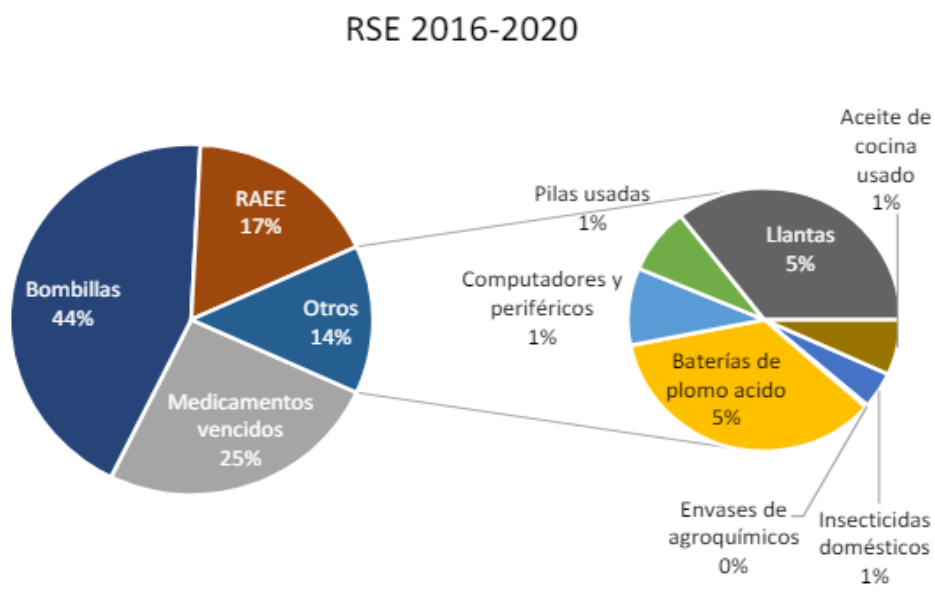
señalización que guía a los ciudadanos sobre los materiales posconsumo que son aceptados para su correcta gestión [1].

Figura 4. *Punto Limpio Metropolitano – Materiales posconsumo recolectados*



Adaptado de [1].

La composición de los Residuos Sólidos Especiales (RSE) recolectados en el periodo 2016-2020 es diversa. La Figura 5 desglosa porcentualmente esta recolección, donde se observa que las llantas usadas y el aceite de cocina usado representan un 5% y 1% respectivamente, dentro de la categoría denominada "Otros" [1].

Figura 5. Caracterización de los residuos sólidos especiales recolectados por tipo de residuo

Adaptado de [1].

Partiendo del dato de recolección anual de residuos sólidos especiales fue de 70.403 toneladas ([14]; [15]), y considerando su participación porcentual dentro de los Residuos Sólidos Especiales (RSE), se calcularon las cantidades totales de WCO y de llantas usadas. La siguiente Tabla 1 desglosa estos resultados, mostrando las toneladas anuales estimadas para cada categoría.

Tabla 1. Cantidades anuales de RSE generados: WCO y llantas usadas

Residuos sólidos especiales (100%)	Otros (14%)	WCO (1% del 14%)	Llantas usadas (5% del 14%)
70.403 ton/Año	9856,42 ton/Año	98,56 ton/Año	492,82 ton/Año

Adaptado de [1].

Estas cantidades representan una disponibilidad significativa de materia prima para su aprovechamiento como rejuvenecedores en mezclas asfálticas recicladas.

6.2 Etapa 2: Selección de artículos científicos y normativa colombiana de infraestructura vial vigente.

La revisión de la literatura se completó utilizando las conocidas bases de datos bibliométricas Scopus y Google Scholar. También se utilizó el portal del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), ya que se trata de la mayor base de datos bibliográfica en línea sobre investigación en materia de transporte en Colombia.

En primer lugar, la búsqueda se realizó utilizando operadores booleanos combinados con las palabras claves de la investigación, tales como:

1. t?re*
2. "crumb rubber"
3. "reclaimed scrap t?res"
4. "*cooking oil"
5. "reclaimed pavement" or RAP
6. "asphalt mixture"
7. HMA
8. "asphalt rubber"
9. "rubberized asphalt"

A partir de estas palabras clave, se construyeron las ecuaciones de búsqueda iniciales. La Tabla 2 detalla estas primeras consultas realizadas en la base de datos Scopus, mostrando cómo la

combinación de términos generó un número amplio de registros que posteriormente serían filtrados y refinados.

Tabla 2. *Ecuaciones de búsqueda*

Ecuaciones de búsqueda N°	Fecha de consulta dd/mm/aa	Base de datos	Ecuación de búsqueda	Número de registros
1	18/01/2024	SCOPUS	[t?re* OR "crumb rubber" OR "reclaimed scrap t?res"] AND "*cooking oil" AND ["reclaimed pavement" or RAP] AND ["asphalt mixture" OR HMA OR "asphalt rubber" OR "rubberized asphalt"]	9
2	20/03/2024	SCOPUS	[t?re* OR "crumb rubber" OR "reclaimed scrap t?res"] OR "*cooking oil" AND ["reclaimed pavement" or RAP] AND ["asphalt mixture" OR HMA OR "asphalt rubber" OR "rubberized asphalt"]	526

A partir de los registros encontrados, se usaron criterios de filtrado que ayudaron a sintetizar los documentos: año de publicación (2013-2024), área temática (ingeniería), tipo de documento (artículo, review y conference paper) y etapa de publicación (final). Se excluyeron palabras clave que no estaban directamente relacionadas con el tema de investigación, como "Chemical analysis," "Superpave," "Rheological properties," "Concrete," "Moisture damage," "Styrene," "Environmental technology," "Software testing," "Lime," "Concrete," "Polymers," "Polymer," "Microstructure," "Energy utilization."

Tras aplicar los filtros de año, área temática y tipo de documento, y excluir las palabras clave no relacionadas, se consolidó la consulta final. La Tabla 3 presenta esta ecuación de búsqueda depurada, la cual permitió acotar los resultados a los 38 registros más pertinentes para la investigación.

Tabla 3. *Ecuaciones de búsqueda final*

Ecuaciones de búsqueda N°	Fecha de consulta dd/mm/aa	Base de datos	Ecuación de búsqueda	Número de registros
1	25/03/2024	SCOPUS	([t?re* OR "crumb rubber" OR "reclaimed scrap t?res"] OR "cooking oil" AND ["reclaimed pavement" OR RAP] AND ["asphalt mixture" OR HMA OR "asphalt rubber" OR "rubberized asphalt"] AND NOT "Chemical analysis" AND NOT "Superpave" AND NOT "Rheological properties" AND NOT "Concrete" AND NOT "Moisture damage" AND NOT "Styrene" AND NOT "Environmental technology" AND NOT "Software testing" AND NOT "Lime" AND NOT "Concrete" AND NOT "Polymers" AND NOT "Polymer" AND NOT "Microstructure" AND NOT "Energy utilization"	38

El último paso del método fue el análisis y la síntesis, que se completó con la lectura minuciosa de los documentos recopilados y la síntesis de las ideas y conclusiones claves relacionadas con este estudio. Por lo que, la muestra final consistió en 38 documentos, los cuales fueron resultado de las ecuaciones de búsqueda de los documentos relacionados y la eliminación de los duplicados.

Con el objetivo de complementar y enriquecer esta investigación, se realizó una búsqueda exhaustiva de la normativa colombiana vigente relacionada con el tema de estudio. Para ello, se consultaron las especificaciones generales de construcción y las normas de ensayo para materiales de carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS).

Dentro de las especificaciones generales de construcción del INVÍAS, se identificó que el capítulo 4, titulado "Pavimentos Asfálticos", contiene información relevante para este proyecto. Este capítulo abarca diversos aspectos relacionados con el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos asfálticos, incluyendo los siguientes artículos:

- Artículo 410: Suministro de cemento asfáltico
- Artículo 413: Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado
- Artículo 450: Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)
- Artículo 457: Mezclas asfálticas prefabricadas almacenadas para parcheo de pavimentos asfálticos
- Artículo 461: Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos
- Artículo 467: Mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado (GTR)

Estos artículos brindan lineamientos, especificaciones técnicas y requisitos de calidad que se deben cumplir en los procesos relacionados con el uso de asfaltos convencionales y modificados, así como en la elaboración y aplicación de mezclas asfálticas tanto en caliente como en frío, incluyendo técnicas de reciclaje.

Adicionalmente, se consultó el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del INVÍAS, el cual está organizado en ocho secciones, desde la 100 hasta la 800. Para esta investigación, se identificaron como relevantes las secciones 700 "Materiales y mezclas asfálticas" y 800 "Prospección de pavimentos", las cuales describen los procedimientos y metodologías para caracterizar y evaluar el desempeño de materiales bituminosos y mezclas asfálticas, así como para el estudio de la condición estructural y funcional de pavimentos existentes.

6.3 Etapa 3: Identificación de rangos y metodologías para la incorporación de GTR y WCO como rejuvenecedores en el RAP a partir de la revisión de literatura.

El Artículo 467-22 establece los requisitos para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente modificadas con GTR [16].

Según esta normativa, el GTR obtenido del proceso de reencauchado de las llantas o de su troceado mediante acción mecánica puede ser utilizado en las mezclas asfálticas como un agente modificador del asfalto. La utilización de GTR por el proceso húmedo proporciona un asfalto modificado que puede ser empleado en la elaboración de mezclas asfálticas [16]. Este proceso de incorporación en húmedo (ARwet), de acuerdo con Picado-Santos et al. [2] y Xu et al. [4], consiste en mezclar el GTR y el asfalto en un tanque de mezclado en obra, permitiendo la interacción entre los componentes durante 45 a 60 minutos a temperaturas entre 190 y 218°C. Sin embargo, Feiteira [17] señala que este proceso tiene una viscosidad superior del ligante final, lo que impacta negativamente la eficiencia de la planta de producción en comparación con otros métodos. Adicionalmente, Peiliang et al. [18] indican que uno de los desafíos del ARwet es mantener la adherencia entre el ligante y los agregados, especialmente en capas superficiales expuestas a condiciones de humedad.

La normativa establece los requisitos para los materiales a utilizar en estas mezclas, incluyendo:

Cemento asfáltico modificado con GTR: La normativa establece que este debe corresponder a los tipos I, II o III. La selección del tipo adecuado para niveles de tránsito NT2/NT3 se realiza en función de las condiciones climáticas locales, como se detalla en la siguiente tabla, la cual relaciona la temperatura media anual de la región con el tipo de asfalto que se debe emplear.

Figura 6. Tipo de asfalto por emplear en mezclas con asfaltos modificados con GTR (Tabla 467-1).

Nivel de tránsito NT2 / NT3		
Temperatura media anual de la región (°C)		
> 24	15 - 24	< 15
Tipo I	Tipo II	Tipo III

Adaptado de [16].

GTR: El grano de caucho reciclado debe cumplir con las características físicas y de pureza estipuladas en el Artículo 413. La figura 7 detalla estos requisitos, especificando los valores límite para propiedades como la humedad, la gravedad específica y el contenido de elementos extraños.

Figura 7. *Características del GTR (Tabla 413-1)*

Característica	Norma de ensayo	Requisito
Humedad (Nota 1), respecto la masa total, máximo (%)	ASTM D1864/D1864M	0,75
Gravedad específica	ASTM D3289	1,15 ± 0,05
Contenido de metales no ferrosos		Sin presencia visible
Contenido de fibra en masa, máximo (%): - Para mezclas en caliente (%) - Para riegos (%)	ASTM 5603	0,5 0,1
Contenido de polvo mineral (como talco [Nota 2]), máximo (%)		4,0
Contenido total de otros elementos extraños (arena, vidrio, madera, etc.), en masa, máximo (%)		0,25

Adaptado de [19].

Además de las características físicas, la normativa también especifica los requerimientos granulométricos del GTR. La figura 8 presenta las tres distribuciones de tamaño aceptadas (Tipo A, B y C), indicando los porcentajes que deben pasar por cada tamiz y el contenido mínimo de caucho requerido en el asfalto para cada tipo.

Figura 8. *Distribución de tamaños del GTR (Tabla 413-2)*

Tamiz		Granulometrías		
Abertura (mm)	Designación	Tipo A	Tipo B	Tipo C
		Pasa tamiz (%)		
2,000	Nro. 10	100	-	-
1,180	Nro. 16	75 – 100	-	-
0,850	Nro. 20	59 – 90	100	-
0,600	Nro. 30	25 – 60	75 – 100	100
0,425	Nro. 40	10 – 40	55 – 90	80 – 100
0,300	Nro. 50	0 – 20	25 – 60	60 – 100
0,150	Nro. 100	0 – 10	0 – 30	4 – 70
0,075	Nro. 200	0 – 5	0 – 10	0 – 20
Contenido mínimo de GCR en el asfalto, en masa (%)		17	15	12

Adaptado de [19].

Adicionalmente, es importante considerar el proceso de modificación del asfalto con GTR, que se clasifica en dos categorías según el porcentaje de GTR utilizado:

Proceso de alta viscosidad:

Se utiliza cuando el porcentaje de GTR es igual o superior al 15% (fracción en masa) del asfalto por vía húmeda.

Debe cumplir con los requisitos físicos de la Tabla 413-3 (asfalto-caucho fresco) (figura 9). Esta tabla se aplica cuando se busca un mayor efecto modificador del GTR en el asfalto, lo que puede resultar en una mayor resistencia a la deformación permanente y al agrietamiento.

Figura 9. Especificaciones para el cemento asfáltico modificado con GTR (Tabla 413-3)

Características	Norma de ensayo	Asfalto - caucho			
		Tipo I	Tipo II	Tipo III	
Asfalto Base Original					
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s) (0,1 mm)	INV E-706	Reportar los resultados de estas propiedades del asfalto base conforme al artículo 410			
Punto de ablandamiento (°C)	INV E-712				
Índice de penetración	INV E-724				
Viscosidad a 60 °C (Pa-s)					
Viscosidad a 135 °C (Pa-s)	INV E-716 o INV E-717 o NTC 5117:2017				
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min) (cm)	INV E-702				
Solubilidad en tricloroetileno (%)	INV E-713				
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland (°C)	INV E-709				
Asfalto - Caucho fresco					
Penetración a 25 °C (100 g, 5 s) (0,1 mm)	INV E-706	Mín. Máx.	25 75	25 75	50 100
Penetración a 4 °C (200 g, 60 s) (0,1 mm)	INV E-706	Mín.	10	15	25
Punto de ablandamiento (°C)	INV E-712	Mín.	57	54	52
Viscosidad aparente a 135 °C (Pa-s)	ASTM D7741/D7741M		Reportar		
Viscosidad aparente a 175 °C (Pa-s)		Mín. Máx.	1,5 5,0	1,5 5,0	1,5 5,0
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland (°C)	INV E-709	Mín.	230	230	230
Estabilidad al almacenamiento: cambio en el punto de ablandamiento (°C)	INV E-726		Reportar		
Incremento en el punto de ablandamiento respecto al asfalto original (°C)	INV E-712		Reportar		
Recuperación elástica por torsión a 25 °C (%)	INV E-727		Reportar		
Resiliencia a 25 °C (%)	ASTM D5329	Mín.	25	20	10
Asfalto-caucho residual luego del acondicionamiento en película delgada conforme a la norma INV E-721 o ASTM D1754 (3,2 mm, 50 g, 163 °C) (Nota):					
Cambio de masa por calentamiento a 163 °C (%)	INV E-721		Reportar		
Penetración a 4 °C (200 g, 60 s) (0,1 mm)	INV E-706		Reportar		
Penetración retenida a 4 °C: % de la penetración original	INV E-706	Mín.	75	75	75
Incremento en el punto de ablandamiento (°C)	INV E-712		Reportar		
Índice de envejecimiento: relación entre viscosidades a 135 °C, de los asfaltos residual y original	NTC 5117:2017 o ASTM D7741/D7741M		Reportar		

Proceso de baja viscosidad:

Se utiliza cuando el porcentaje de GTR es inferior al 15% (fracción en masa) del asfalto por vía húmeda. Debe cumplir con los requisitos físicos de la norma AASHTO M320 (figura 10).

Esta norma se aplica cuando se busca una modificación más moderada del asfalto, que puede ser adecuada para condiciones de tráfico menos exigentes o climas más templados.

Figura 10. *Performance-Graded Asphalt Binder Specification (Tabla 1 AASHTO M320-16)*

Performance Grade	PG 46			PG 52							PG 58					PG 64					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Average 7-day max pavement design temp, °C ^a	<46			<52							<58					<64					
Min pavement design temperature, °C ^d	≥ 34	≥ 40	≥ 46	≥ 10	≥ 16	≥ 22	≥ 28	≥ 34	≥ 40	≥ 46	≥ 16	≥ 22	≥ 28	≥ 34	≥ 40	≥ 10	≥ 16	≥ 22	≥ 28	≥ 34	≥ 40
Original Binder																					
Flash point temp, T 48, min °C	230																				
Viscosity, T 316: ^b max 3 Pa·s, test temp, °C	135																				
Dynamic shear, T 315: ^c G*/sinδ, ^d min 1.00 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	46			52							58					64					
Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)																					
Mass change, ^e max, percent	1.00																				
Dynamic shear, T 315: G*/sinδ, ^d min 2.20 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	46			52							58					64					
Pressurized Aging Vessel Residue (R 28)																					
PAV aging temperature, °C ^f	90			90							100					100					
Dynamic shear, T 315: G* sinδ, ^d max 5000 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Creep stiffness, T 313: ^g S, max 300 MPa m-value, min 0.300 test temp @ 60 s, °C																					
Direct tension, T 314: ^h Failure strain, min 1.0% test temp @ 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Performance Grade	PG 70						PG 76					PG 82				
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Average 7-day max pavement design temperature, °C ^a	<70						<76					<82				
Min pavement design temperature, °C ^d	≥ 10	≥ 16	≥ 22	≥ 28	≥ 34	≥ 40	≥ 10	≥ 16	≥ 22	≥ 28	≥ 34	≥ 10	≥ 16	≥ 22	≥ 28	≥ 34
Original Binder																
Flash point temp, T 48, min °C	230															
Viscosity, T 316: ^b max 3 Pa·s, test temp, °C	135															
Dynamic shear, T 315: ^c G*/sin δ, ^d min 1.00 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	70						76					82				
Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)																
Mass change, ^e max, percent	1.00															
Dynamic shear, T 315: G*/sin δ, ^d min 2.20 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	70						76					82				
Pressurized Aging Vessel Residue (R 28)																
PAV aging temperature, °C ^f	100 (110)						100 (110)					100 (110)				
Dynamic shear, T 315: G* sin δ, ^d max 5000 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Creep stiffness, T 313: ^g S, max 300 MPa m-value, min 0.300 test temp @ 60 s, °C																
Direct tension, T 314: ^h Failure strain, min 1.0% test temp @ 1.0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

Adaptado de [19].

Agregados pétreos y llenante mineral: Deben satisfacer los requisitos del Artículo 450. La siguiente figura 11 define las franjas granulométricas que deben cumplir los agregados, especificando los porcentajes de pasa-tamiz para cada tipo de mezcla asfáltica con GTR.

Figura 11. *Franjas granulométricas para mezclas asfálticas con GTR (Tabla 467-2)*

Tipo de mezcla	Tamiz (mm / U.S. Standard)								
	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75	2,36	0,60	0,30	0,075
	1 Pulgada	3/4 Pulgada	1/2 Pulgada	3/8 Pulgada	Nro. 4	Nro. 8	Nro. 30	Nro. 50	Nro. 200
Pasa tamiz (%)									
M-GCR-25	100	90 - 100	65 - 85	50 - 70	30 - 45	16 - 28	6 - 16	4 - 12	2 - 6
M-GCR-19		100	90 - 100	70 - 90	35 - 50	20 - 32	8 - 18	5 - 14	2 - 6
M-GCR-12			100	90 - 100	50 - 65	28 - 40	12 - 22	6 - 16	3 - 7
Tolerancias en la fórmula de trabajo (±)	4 %					3 %			2 %

Adaptado de [16].

El tipo de mezcla asfáltica en caliente por emplear debe depender del tipo y del espesor compacto de la capa asfáltica conforme con lo indicado en la Tabla 467-3.

Figura 12. *Tipo de gradación por utilizar en función del tipo y espesor compacto de la capa (Tabla 467-3)*

Tipo de capa	Espesor compacto (mm)	Tipo de mezcla
RODADURA	35 - 45	M-GCR-12
	45 - 60	M-GCR-12 M-GCR-19
	> 60	M-GCR-19 M-GCR-25
INTERMEDIA	> 60	M-GCR-25

Adaptado de [16].

La normativa también establece los requisitos para el diseño de la mezcla asfáltica. La siguiente figura 13 resume el procedimiento metodológico a seguir, detallando los pasos que van desde el diseño preliminar y la optimización hasta la verificación y el ajuste final de la fórmula de trabajo.

Figura 13. *Pasos por seguir para el diseño de mezclas asfálticas con GTR (Tabla 467-4)*

Pasos	Descripción	Numeral
Diseño preliminar	- Estabilidad - Flujo - Propiedades volumétricas (Marshall)	467.4.1.2.1
Determinación intervalo óptimo	- Resistencia al ahuecamiento	467.4.1.2.2
Verificación del diseño	- Evaluación adherencia - Módulo resiliente - Resistencia a la fatiga	467.4.1.2.3
Ajuste de la fórmula de trabajo	- Por resultados de las pruebas realizadas durante la fase de experimentación - Por variación de la procedencia o de las características de alguno de los componentes de la mezcla o cuando se rebasan las tolerancias granulométricas	467.4.1.2.4

Adaptado de [16].

Además, se especifican los criterios de aceptación para el control de calidad de los materiales y del producto terminado, incluyendo aspectos como la calidad del cemento asfáltico modificado con GTR, la calidad de los agregados pétreos y del llenante mineral, la composición de la mezcla, la calidad de la mezcla asfáltica y la calidad del producto terminado (compactación, espesor, planicidad, textura, resistencia al deslizamiento, regularidad superficial, entre otros) [16].

Para la fase de diseño preliminar, la mezcla debe cumplir con una serie de criterios volumétricos y mecánicos. La siguiente figura 14 detalla estos requisitos para las categorías de tránsito NT2/NT3, especificando los valores mínimos o los rangos aceptables para parámetros clave como la compactación, el contenido de asfalto, la estabilidad Marshall y los vacíos.

Figura 14. *Criterios para el diseño preliminar de mezclas asfálticas con GTR (Tabla 467 – 5)*

Característica		Criterio categorías NT2 / NT3	Norma de ensayo INV
Compactación (golpes / cara)		75	INV E-824
Contenido de asfalto-caucho (%)		6,0 - 9,0	
Estabilidad mínima (N)		8 250	
Flujo (mm)		2,5 - 5,5	
Vacíos con aire (%)		3,0 - 5,0	INV E-799
Vacíos en agregados minerales (%)	M-GCR-25	> 14	
	M-GCR-19	> 15	
	M-GCR-12	> 16	
Vacíos llenos de asfalto - VFA (%)		Reportar	
Relación filler/ligante (p/p)		Reportar	
Espesor promedio mínimo de película de asfalto (μm)		7,5	INV E-741

Adaptado de [16].

Actualmente no hay una normativa colombiana que utilice el proceso en seco (ARdry), pero éste también puede ser utilizado en este tipo de mezclas recicladas. El proceso ARdry es una alternativa que consiste en adicionar directamente el GTR a la mezcla asfáltica durante la producción, sin una etapa previa de interacción con el asfalto. Picado-Santos et al. [2] ha demostrado que este proceso también puede mejorar las propiedades reológicas del asfalto.

En el proceso ARdry, el GTR y el asfalto entran en contacto en la mezcladora y durante el transporte, con un tiempo de interacción de aproximadamente 90 minutos antes de la compactación. Este método permite obtener características similares al asfalto de caucho producido por el método húmedo (ARwet), pero con un menor impacto en la eficiencia de la planta de producción [17].

Como no existe una normativa para el proceso en seco, se puede asumir que los requerimientos establecidos en términos de granulometría y calidad de los materiales corresponden a las características especificadas en las Tablas 413-1 y 413-2 del Artículo 413 y la Tabla 467-2 y 467-3 o una granulometría de aceptación internacional que demuestre un correcto desempeño para este tipo de mezcla.

De acuerdo con la revisión bibliométrica sobre el efecto del GTR sobre el Asfalto Envejecido del RAP, Los estudios han demostrado que el pretratamiento del GTR con WCO mejora significativamente la dispersión del GTR en el asfalto, contribuyendo a una mejor estabilidad térmica de la mezcla ([12]; [20]). Además, el pretratamiento altera la morfología del GTR, suavizando los bordes y generando cavidades y surcos [12].

La revisión bibliométrica indica que el pretratamiento del GTR con WCO mejora la dispersión del caucho en el asfalto. La siguiente Tabla 4 resume las condiciones óptimas para este proceso encontradas en diversos estudios, detallando las proporciones de masa GTR:WCO, temperaturas y tiempos de mezclado que han mostrado mejores resultados.

Tabla 4. *Condiciones Óptimas para la Incorporación de GTR Pretratado con WCO en Mezclas Asfálticas*

Autor	Año	Masa GTR: WCO	Temperatura Mezclado	Tiempo Mezclado
Ma et al.	2021	3:1	190°C	60 min
Dong et al.	2018	3:2, 5:3	240-280°C	120 min
Ziari et al.	2022	1:4	180°C	60 min
Yang & Dong	2022	3:5	250°C	60 min
Zhao et al.	2021	2:5, 1:2	> 260°C	240 min
Yi et al.	2021	1:4, 2:3	260 ± 10°C	30 min

Adaptado de [4].

6.3.1 Efecto del WCO sobre el Asfalto Envejecido del RAP

Por otro lado, la Tabla 5 muestra el efecto de la incorporación de diferentes porcentajes de WCO en las propiedades del asfalto envejecido del RAP. Diversos estudios han concluido que el WCO tiene la capacidad de restaurar las propiedades químicas y físicas del asfalto envejecido, mejorando su trabajabilidad y desempeño ([21]; [4]). En particular, se ha determinado que un porcentaje óptimo de WCO entre el 5-10% esto teniendo en cuenta que se debe tener algunas medidas como el pretratamiento de WCO, la mezcla con asfalto duro o la adición de aditivos, los porcentajes varían dependiendo de muchos factores, 4% WCO es recomendado para regiones climáticas moderadas con nivel de tráfico medio, 6-8% WCO es recomendado para regiones climáticas frías con bajo nivel de tráfico, como lo podemos observar en la tabla 5. [22].

Tabla 5. *Porcentaje Óptimo de WCO en Mezclas Asfálticas*

Autor	Año	Título	Porcentaje Óptimo de WCO
Li et al.	2021	Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance of aged asphalt	3.5-4%
Zhang et al.	2020	Effect of waste cooking oil on asphalt performance at high and low temperatures in recycled asphalt mixtures	6%
Jain and Chandrappa	2022	Rheological and chemical investigation on asphalt binder incorporating high recycled asphalt with waste cooking oil as rejuvenator	5-7.5%
Xu et al.	2023	Research progress on resource utilization of waste cooking oil in asphalt materials: A state-of-the-art review	6-8%
El-Shorbagy et al.	2019	Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement	3.5-5.5%

6.4 Etapa 4: Análisis del efecto de la composición del GTR y WCO sobre las propiedades del asfalto recuperado del RAP

Esta sección examina cómo la incorporación de GTR y WCO afecta las propiedades del asfalto envejecido recuperado del RAP. Se revisaron estudios y documentos técnicos relevantes para proporcionar una evaluación detallada y bien fundamentada.

6.4.1 Efecto del GTR sobre el Asfalto Envejecido del RAP

Para analizar el impacto individual de cada aditivo, la Tabla 6 resume los efectos que el Grano de Caucho Reciclado (GTR) y el Aceite de Cocina Usado (WCO) tienen sobre las propiedades del asfalto envejecido. La tabla detalla, con base en la literatura científica, cómo cada componente modifica características fundamentales como la penetración, el punto de ablandamiento, la ductilidad y la viscosidad del ligante.

Tabla 6. *Efecto del GTR sobre el asfalto envejecido del RAP*

Propiedad	Efecto	Explicación	Referencia
Penetración	Aumenta	La incorporación de GTR reduce la rigidez del asfalto, incrementando la penetración y haciéndolo más blando.	[23], [24], [25]
Punto de ablandamiento	Disminuye	El GTR disminuye la proporción de asfaltenos de alto peso molecular, lo que reduce el punto de ablandamiento y hace que el material sea más dúctil.	[23], [24], [25], [17]
Ductilidad	Aumenta	La incorporación de GTR mejora la flexibilidad y la capacidad de deformación del asfalto, aumentando la ductilidad y mejorando las propiedades adhesivas.	[23], [24], [25]

Viscosidad	Disminuye	El GTR reduce la viscosidad del asfalto, mejorando la trabajabilidad y reduciendo las temperaturas de mezcla y compactación requeridas.	[23], [24], [25]
Resistencia a la fatiga	Mejora	La adición de GTR aumenta la resistencia a la fatiga del asfalto, mejorando el desempeño de la mezcla asfáltica bajo cargas cíclicas.	[23], [24], [25], [26]
Resistencia al ahuellamiento	Mejora	El GTR mejora la resistencia al ahuellamiento del asfalto, aumentando la capacidad de la mezcla asfáltica para soportar deformaciones permanentes.	[23], [24], [25]
Módulo resiliente	Aumenta	La incorporación de GTR incrementa el módulo resiliente del asfalto, lo que mejora la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir deformaciones elásticas.	[23], [24], [25]

De forma complementaria al GTR, el Aceite de Cocina Usado (WCO) funciona como un agente rejuvenecedor que restaura las propiedades del ligante envejecido. La Tabla 7 resume los efectos específicos del WCO documentados en la literatura, detallando cómo su incorporación impacta en parámetros clave del asfalto como la penetración, el punto de ablandamiento y viscosidad.

Tabla 7. *Efecto del WCO sobre el asfalto envejecido del RAP*

Propiedad	Efecto	Explicación	Referencia
Penetración	Aumenta	El WCO reduce la proporción de asfaltenos de alto peso molecular, incrementando la penetración y haciendo el asfalto más blando.	[27], [13], [28], [29]
Punto de ablandamiento	Disminuye	El WCO disminuye la proporción de asfaltenos, lo que reduce el punto de ablandamiento del asfalto y lo hace más dúctil.	[30], [31], [13], [32]
Ductilidad	Aumenta	La incorporación de WCO mejora la flexibilidad y la capacidad de deformación del asfalto, aumentando la ductilidad y mejorando las propiedades adhesivas.	[30], [31], [13], [32]
Viscosidad	Disminuye	El WCO reduce la viscosidad del asfalto, mejorando la trabajabilidad y reduciendo las temperaturas de mezcla y compactación requeridas.	[30], [31], [13], [32]

Propiedad	Efecto	Explicación	Referencia
Distribución del peso molecular	Mejora	El tratamiento del GTR con WCO altera la distribución del peso molecular, descomponiendo las moléculas de mayor peso en moléculas de menor peso, lo que facilita la dispersión uniforme del GTR en el asfalto.	[13], [12]
Estabilidad térmica	Mejora	La alteración de la distribución del peso molecular del GTR tratado con WCO también mejora la estabilidad térmica del asfalto modificado con GTR.	[13], [12]

6.4.2 Beneficios Combinados de GTR y WCO

Sinergia en la Restauración del Asfalto:

La combinación de GTR y WCO ofrece beneficios sinérgicos significativos, según Xu et al. [4]. Por un lado, el GTR proporciona mejoras en la elasticidad, resistencia a la fatiga y durabilidad del asfalto envejecido. Por otro lado, el WCO actúa como un plastificante que restaura las propiedades químicas y reológicas del asfalto envejecido, facilitando su aplicación y compactación. Estos mismos autores concluyen que esta combinación no solo mejora el desempeño mecánico del asfalto reciclado, sino que también aporta beneficios ambientales al reutilizar residuos.

Reducción de Emisiones y Sostenibilidad:

La producción de mezclas asfálticas que incorporan GTR y WCO reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes en comparación con las mezclas tradicionales. Además, el uso de estos rejuvenecedores reciclados disminuye la necesidad de materiales vírgenes, promoviendo una gestión más sostenible de los residuos y mitigando el impacto ambiental del proceso de pavimentación [4].

6.5 Etapa 5: Propuesta de una metodología para la elaboración de mezclas asfálticas usando RAP rejuvenecido con GTR y WCO

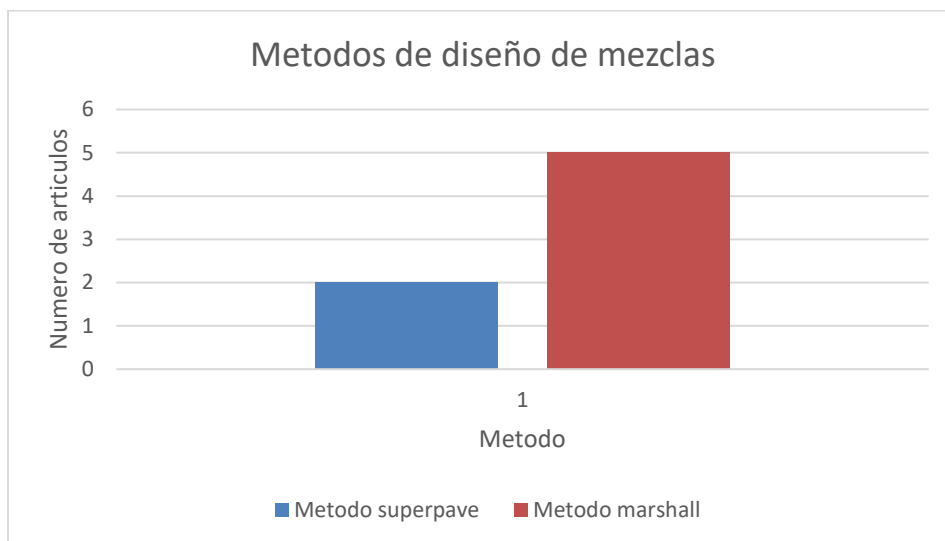
De acuerdo con la literatura y las Especificaciones Generales de Construcción del INVIAS [16], la normativa colombiana establece el uso del método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas recicladas. En el artículo 467 "Mezclas asfálticas con cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado (GTR)", se indica que el diseño preliminar de estas mezclas debe realizarse siguiendo los pasos descritos en la Tabla 467-4 [16], teniendo en cuenta que los pasos descritos aplican a las mezclas asfálticas en caliente. De acuerdo con el análisis de la literatura realizado en la revisión bibliométrica, se encontró que 7 de los artículos consultados aplicaron tanto el uso de aceite de cocina usado (WCO) como el grano de caucho reciclado (GTR) como agentes rejuvenecedores en las mezclas asfálticas recicladas.

Estos artículos mencionan los dos principales métodos que pueden ser utilizados para el diseño de estas mezclas asfálticas recicladas:

Método Marshall: este método es el establecido en la normativa colombiana del INVIAS para el diseño de mezclas asfálticas recicladas en caliente.

Método Superpave: descrito en la norma AASHTO R 35 "Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)", este método también puede ser utilizado para el diseño de mezclas asfálticas recicladas.

El análisis de la literatura reveló que los 7 artículos que utilizaron conjuntamente GTR y WCO emplearon dos métodos principales para el diseño de las mezclas. La Figura 15 compara la frecuencia de uso de cada metodología, mostrando que el método Marshall es el más reportado en los estudios analizados, seguido por el método Superpave.

Figura 15. *Método de diseño de mezclas*

El método Marshall, descrito en la norma INV E-748 "Método de ensayo para la elaboración y compactación en el laboratorio de especímenes de mezcla asfáltica", es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados que cumpla con la granulometría dividida en 3 tipos:

- *M-GTR-25*: mezcla con una granulometría más gruesa, con el 100% pasando el tamiz de 25 mm y un rango del 65-85% pasando el tamiz de 12.5 mm.
- *M-GTR-19*: mezcla con una granulometría intermedia, con el 100% pasando el tamiz de 19 mm y un rango del 70-90% pasando el tamiz de 9.5 mm.
- *M-GTR-12*: mezcla con una granulometría más fina, con el 100% pasando el tamiz de 12.5 mm y un rango del 50-65% pasando el tamiz de 4.75 mm, las cuales tienen las siguientes tolerancias: $\pm 4\%$ en el agregado grueso, $\pm 3\%$ en el agregado fino y $\pm 2\%$ en la llenante mineral.

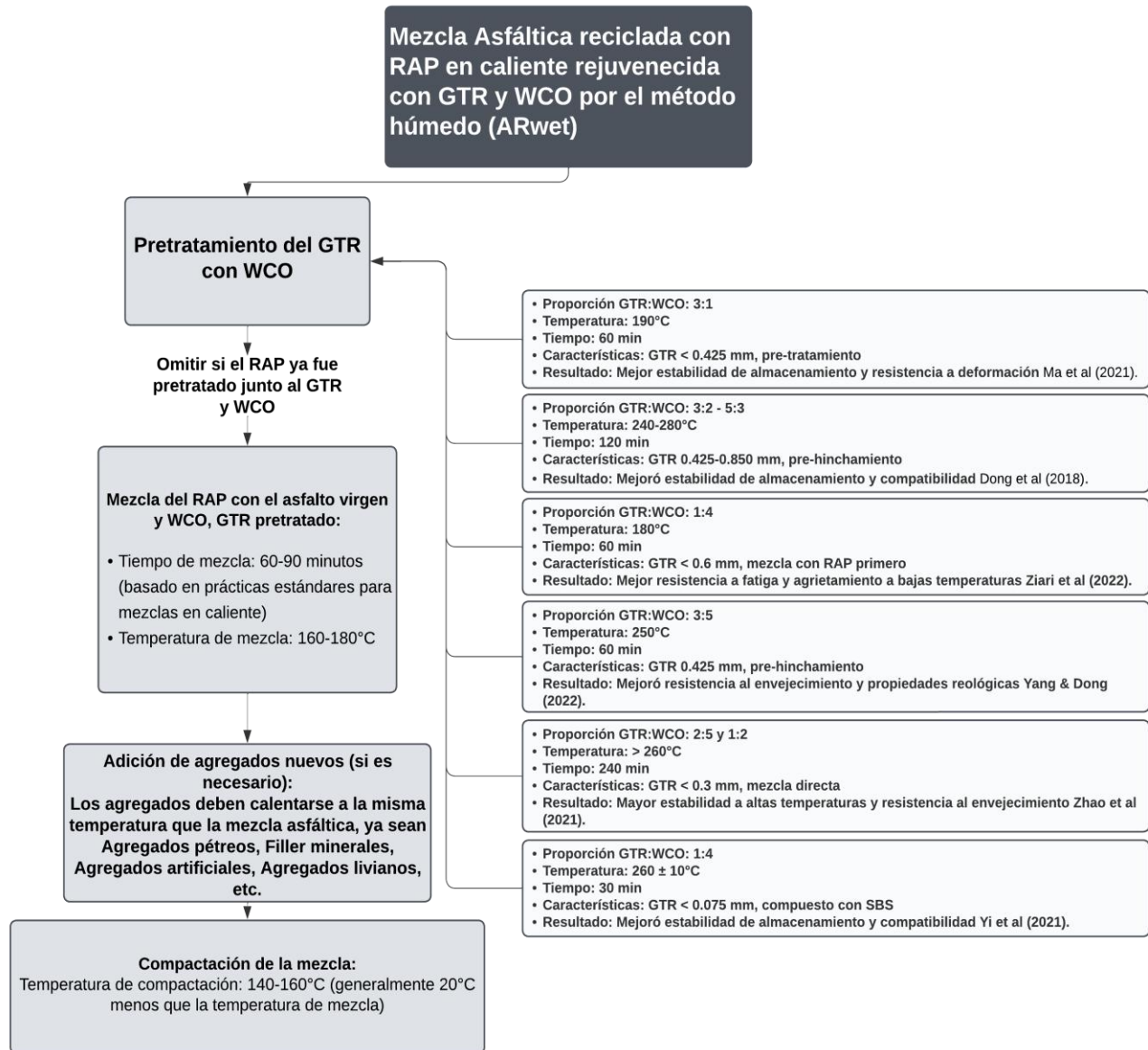
El método Superpave, expresado en inglés como "Superior Performing Asphalt Pavements", está descrito en la norma AASHTO R 35 "Superpave Volumetric Design for Hot-

Mix Asphalt (HMA)". Este método está diseñado para ser utilizado en tres niveles (1, 2 y 3), donde a medida que aumenta el nivel, también lo hace la complejidad y confiabilidad del diseño [23].

- El nivel 1 del método Superpave fue desarrollado para situaciones donde la mezcla asfáltica conforma pavimentos de bajo volumen de tránsito, siendo el más simple y económico de utilizar.
- El nivel 2 fue desarrollado para situaciones donde la mezcla asfáltica conforma pavimentos de volúmenes intermedios de tránsito, siendo el más utilizado para el diseño de mezclas de pavimento asfáltico en el mundo.
- El nivel 3 fue desarrollado inicialmente para evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas sometidas a altos volúmenes de tránsito, siendo el menos utilizado de los tres niveles [23].

6.5.1 Diseño de la mezcla asfáltica reciclada

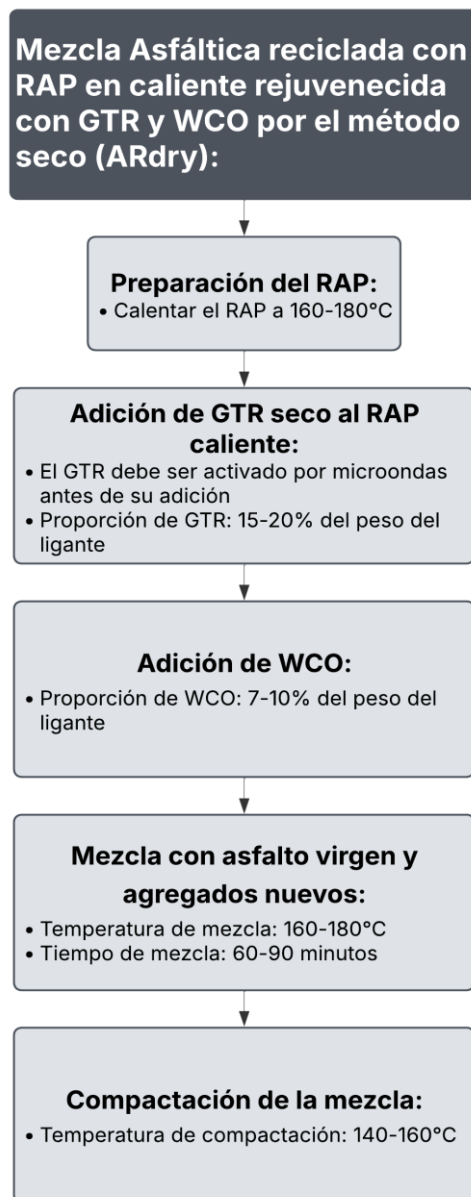
De acuerdo con la revisión bibliográfica, la información reportada sobre la producción de mezclas asfálticas recicladas incorporando GTR y WCO como agentes rejuvenecedores del RAP es limitada. Sólo se ha propuesto una ruta que corresponde a un proceso en caliente en húmedo [16]. De otra parte, en Colombia, la normativa del INVIAS sólo contempla el uso de GTR o WCO por separado. En consecuencia, se proponen tres esquemas novedosos para el uso combinado de ambos agentes: en caliente por vía húmeda (ARwet), en caliente por vía seca (ARdry) y en frío por vía seca (ARdry). El primero de estos, correspondiente al proceso en caliente por el método húmedo (ARwet), se detalla en la Figura 16. Este diagrama de flujo ilustra las etapas del proceso, desde el pretratamiento del GTR con WCO hasta la compactación de la mezcla final, resumiendo además las condiciones óptimas de proporción, temperatura y tiempo reportadas en la literatura para la fase de pretratamiento.

Figura 16. Esquema de proceso de mezclas asfálticas recicladas en caliente ARwet

La segunda metodología propuesta corresponde al proceso en caliente por el método seco (ARdry), el cual se esquematiza en la Figura 17. A diferencia del método húmedo, en este proceso el GTR se adiciona directamente al RAP caliente, seguido por el WCO, antes de mezclarse con el

asfalto virgen y los nuevos agregados. El diagrama detalla las temperaturas y proporciones recomendadas para cada etapa del proceso.

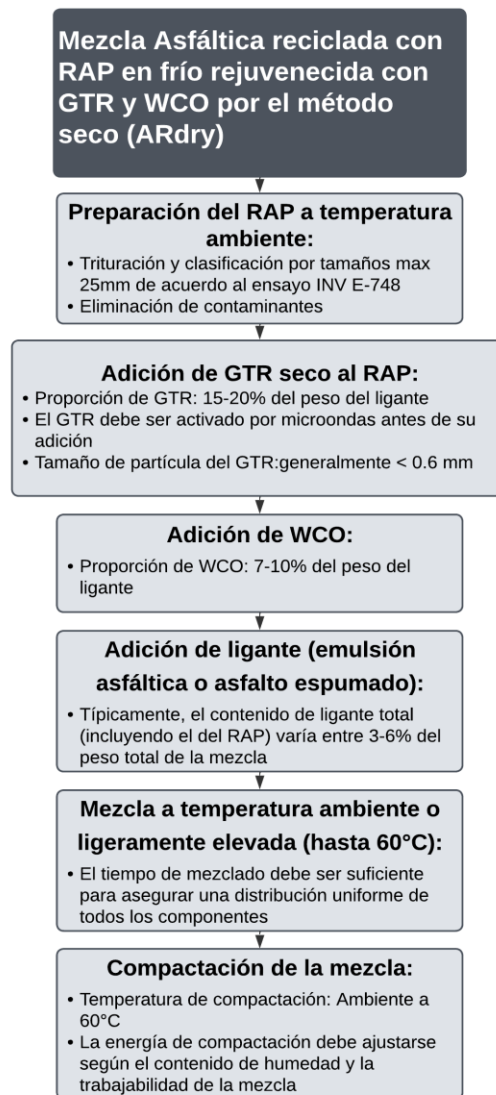
Figura 17. Esquema de proceso de mezclas asfálticas recicladas en caliente ARdry



La tercera y última metodología propuesta es para el reciclaje en frío mediante el método seco (ARdry), cuyo esquema se presenta en la Figura 18. Este proceso se distingue de los anteriores

al realizarse a temperatura ambiente o ligeramente elevada. El diagrama de flujo describe los pasos clave, comenzando con la preparación del RAP, la adición secuencial de GTR y WCO, la incorporación de un ligante en emulsión o espumado, y finalizando con una compactación a baja temperatura.

Figura 18. Esquema de proceso de mezclas asfálticas recicladas en frío ARdry



7. Conclusiones

1. Este estudio teórico confirma la disponibilidad de materias primas en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), donde se identificó una generación anual de aproximadamente 98,56 toneladas de WCO y 492,82 toneladas de llantas. Existe un potencial claro para incorporar estos materiales como rejuvenecedores en la preparación de mezclas asfálticas con RAP, lo que facilitaría la sustitución de una porción importante de áridos y ligantes vírgenes.
2. Se constató, además, que la logística de recolección de estos residuos en el AMB ya está articulada. Se utilizan canales como los "puntos limpios", la recolección en restaurantes y otros programas de gestión especial, lo que simplifica su canalización hacia un eventual aprovechamiento en la industria de la pavimentación.
3. El análisis de la literatura revela que el uso combinado de GTR y WCO para rejuvenecer el ligante del RAP ofrece resultados muy alentadores. Aunque las condiciones óptimas de mezclado no son universales y dependen de los materiales, los estudios analizados suelen reportar rangos de temperatura efectivos entre 180°C y 260°C, con tiempos de interacción que oscilan entre 30 y 240 minutos.
4. Determinar la dosificación precisa de GTR y WCO está en función del nivel de envejecimiento del ligante y de los parámetros de desempeño deseados. La revisión bibliográfica sugiere que se pueden explorar proporciones másicas de GTR:WCO en un amplio rango (desde 1:4 hasta 3:1) y que el contenido total del rejuvenecedor combinado puede oscilar entre el 3% y el 20% del peso del ligante.
5. Se concluye que la adición conjunta de GTR y WCO produce una mejora sinérgica en las propiedades del asfalto oxidado. Los estudios reportan un incremento en la resistencia al

ahuellamiento (deformación permanente) y un mejor desempeño en climas fríos, todo esto mientras se conserva una viscosidad que permite una adecuada trabajabilidad de la mezcla.

6. La propuesta metodológica de este trabajo para la fabricación de un pavimento nuevo se basa en la elaboración de mezclas en caliente de tipo denso (gradación continua). Dicha metodología debe alinearse con las especificaciones de INVIAS para asfaltos modificados con GTR. Se estima que, optimizando las proporciones de GTR y WCO a las características de los materiales locales, sería viable incorporar tasas de RAP de hasta el 40%.
7. El uso de GTR y WCO como rejuvenecedores ofrece un doble beneficio: no solo se optimiza el desempeño mecánico de las mezclas recicladas, sino que se impulsa un modelo de economía circular en la industria de la pavimentación. Esto se logra al disminuir la cantidad de residuos enviados a disposición final y reducir el consumo de agregados y ligantes vírgenes.
8. Adoptar esta tecnología en el Área Metropolitana de Bucaramanga tendría el potencial de generar beneficios económicos y ambientales considerables. Permitiría la valorización de residuos generados localmente y, al mismo tiempo, disminuiría la demanda de nuevos materiales para los proyectos de mantenimiento y construcción vial.
9. Este trabajo de grado constituye el fundamento teórico que justifica la realización de futuras investigaciones experimentales. Dichos estudios podrán enfocarse en la aplicación de GTR y WCO en mezclas recicladas dentro del AMB, lo cual aportará al desarrollo de prácticas más sostenibles en la pavimentación local.
10. La recomendación principal es escalar esta investigación a una fase experimental, diseñada específicamente para las condiciones del AMB. El objetivo de dichos estudios será validar

los métodos de incorporación y ajustar las dosificaciones de GTR y WCO, tomando en cuenta las propiedades de los materiales locales y los factores climáticos de la región.

Referencias

- [1] Alcaldía de Bucaramanga, "Plan de gestión integral de residuos sólidos," 2023. [Online]. Available: <https://santandercompetitivo.org/biblioteca-de-documentos/competitividad-en-santander/plan-de-gestin-integral-de-residuos-slidos-pgirs-bucaramanga-2022-2033pdf/>.
- [2] L. G. Picado Santos, S. D. Capitaó and J. M. Neves, "Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review. Construction and Building Materials, 247, 118577.," 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118577>.
- [3] A. Aljarmouzi and R. Dong, "Sustainable Asphalt Rejuvenation by Using Waste Tire Rubber Mixed with Waste Oils," 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8246>.
- [4] N. Xu, H. Wang, H. Wang, K. Mohammadjavad and F. Elham, "Research progress on resource utilization of waste cooking oil in asphalt," 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135427>.
- [5] B. Patiño, O. Reyes and T. Camacho, "Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas colombianas con adición de pavimento reciclado al 100%," 2015. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-921X2015000100006&script=sci_arttext.
- [6] A. Behnood, "Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical," 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619317433>.
- [7] H. ASLI and R. Karim, "IMPLEMENTITION OF WASTE COOKING OIL AS RAP REJUVENATOR," 2011. [Online]. Available: https://www.jstage.jst.go.jp/article/eastpro/2011/0/2011_0_267/_article.

- [8] ONU, "Acuerdo de Paris," 2015. [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf.
- [9] M. d. A. y. D. Sostenible, "Resolución 1326 de 2017," Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia, 2017.
- [10] L. Rodriguez, J. Munar and A. Vallejo, "Modelo ambiental para el tratamiento de llantas usadas," 2013. [Online]. Available: <https://repositoriocrai.ucompensar.edu.co/entities/publication/0eb27dab-6ec7-4164-b0dd-7f37caf02096>.
- [11] A. L. Ortiz, "Instructivo del proceso constructivo de una vía en pavimento flexible.," 2017. [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/23077/OrtizManceraAngieLorenaAnexo-1.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- [12] R. Z. M. X. W. Y. X. D. P. T. Dong, "Chemical and microscopic investigation of co-pyrolysis of crumb tire rubber with waste cooking oil at mild temperature," 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18305117>.
- [13] H. a. S. a. L. a. S. b. L. a. L. X. Ma a, "Understanding the role of waste cooking oil residue during the preparation of rubber asphalt," 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344920305504>.
- [14] Ecolecúa & Grasecol, "Pagina oficial de Ecolecúa," 2019. [Online]. Available: <https://web.facebook.com/ecolecua.com.co/posts/pfbid0nsiVrzLDQvSHX83eAx8QDWahQEvfZZPN>.
- [15] P. Reyes, "Puntos limpios: el aprovechamiento del aceite de cocina en Bucaramanga," *Periodico 15*, 2019.
- [16] INVIAS, "Artículo 467 – 22 Mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico," 2022.

- [17] P. S. C. Feiteira Dias, "Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network," 30 12 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181401126X>. [Accessed 2025].
- [18] Z. C. W. G. Peiliang cong, "Influence of moisture on the migration of asphalt components and the adhesion between asphalt binder and aggregate," 3 Julio 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823012266?via%3Dihub>. [Accessed 22 Julio 2024].
- [19] INVIAS, "Artículo 413-20 Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado," 2020.
- [20] D. R. Yang H, "Investigating the properties of rejuvenated asphalt with the modified rejuvenator prepared by waste cooking oil and waste tire crumb rubber," 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821034267>.
- [21] D. R. Z. M. S. C. Y. J. Yi X, "The interaction mechanism and rejuvenation effect of crumb rubber and waste cooking oil blends," 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821019759>.
- [22] S. A. W. Z. C. C. Al-Khateeb, "State-of-the-Art Review on the Behavior of Bio-Asphalt Binders and Mixtures," 13 Agosto 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1420-3049/29/16/3835>. [Accessed 10 enero 2025].
- [23] AASHTO R 35-17, "Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials.," 2019.
- [24] M. C. Rubio, G. Martinez, L. Baena and F. Moreno, "Warm mix asphalt: An overview. Journal of Cleaner Production," 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>.

- [25] M. Zaumanis, R. Mallick and R. Frank, "100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. Resources, Conservation and Recycling," 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>.
- [26] J. Romero Pumayali, "MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EN FRIO PARA OPTIMIZAR," 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/6887>.
- [27] C. Jair, "Rheological and chemical investigation on asphalt binder incorporating high recycled asphalt with waste cooking oil as rejuvenator," [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-022-00871-3>.
- [28] M. C. M.-N. F. M.-E. M. J. J. d. B.-C. A. & C.-M. E. Rubio, "Cleaner technologies for asphalt mixtures combining reuse of waste materials and warm mix asphalt.," *Scientific Reports*, pp. 1-14, 2022.
- [29] H. A. F.-G. W. D. & Z.-M. C. A. Rondón-Quintana, "Calidad de adhesión y propiedades reológicas de asfaltos residuales, no modificados y nano-modificados, obtenidos de crudos pesados de pavimentación.," *Revista EIA*, pp. 47-62, 2016.
- [30] F. S. M. M. J. P. M. & R. M. C. Moreno, "Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con polvo de neumático.," *Revista de Obras Públicas*, pp. 27-36., 2013.
- [31] M. A. B. P. S. Y. Ziari H, "Mechanical performance evaluation of crumb rubber enriched rejuvenator modified RAP mixtures," 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182201621X>.
- [32] D. R. C. Z. A. A. L. J. Zhao M, "Effect of process variables on the chemical characteristics of crumb rubber desulfurized by waste cooking oil and its desulfurization mechanism," 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820340861>.