

**Análisis Teórico de la Incorporación de Aceite Residual de Cocina como Rejuvenecedor del
RAP para la Creación de Pavimentos Sostenibles en el Área Metropolitana de
Bucaramanga.**

Danna Vanessa Vasquez Ortiz, Valentina Valdivieso Velasco

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Paalo Andrea Moreno Yáñez

Dra. en Ingeniería Química

Codirector

Vladimir Plata Chávez

Dr. en Ingeniería Química

Universidad Santo Tomás

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2021

Agradecimientos

A Dios, por ser el conductor y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener una de las metas más deseadas, como es prepararnos para alcanzar el título de ingeniero civil.

A nuestros padres, por ser nuestro apoyo incondicional y el pilar fundamental para continuar cuando creímos desfallecer a lo largo de este proceso.

A nuestra directora, la profesora Paalo Moreno Yáñez por brindarnos su confianza, su conocimiento y el apoyo incondicional durante la realización de este proyecto de investigación.

A nuestro codirector, el profesor Vladimir Plata Chávez por brindarnos su colaboración y por depositar su confianza en nosotras para llevar a cabo este proyecto de investigación.

A la Universidad Santo Tomás y especialmente a nuestros profesores de la Facultad de Ingeniería Civil por la formación académica adquirida durante el transcurso de nuestra carrera.

Finalmente, a todas las personas que hicieron parte de este proceso, gracias.

Dedicatoria

A mis padres Juan Pablo Valdivieso Ducón y Andrea Velasco Peña por ser los principales motores de mis sueños, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida y por haberme forjado como la persona que soy hoy en día. Una persona resiliente, responsable, llena de principios y valores que adora los retos y no se rinde fácilmente.

Valentina Valdivieso Velasco

A mis padres Maricel Ortiz, Lenin Pastrana y Willinton Vásquez por impulsarme a cumplir mis sueños y apoyarme en cada una de las etapas de mi vida, por estar siempre dispuestos a ayudarme y por inculcarme el valor de la responsabilidad y la excelencia, por enseñarme a no rendirme y luchar por todo lo que me propongo.

Danna Vásquez Ortiz

Contenido

	Pág
Introducción	11
1. Formulación del Problema.....	13
2. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. Justificación	15
4. Estado del Arte.....	16
4.1. Pavimentos flexibles	18
4.2. Ligantes asfálticos.....	19
4.3. Mezclas asfálticas	21
4.3.1 Propiedades de las mezclas asfálticas	22
4.3.2 Mecanismos de daño de mezclas asfálticas para el diseño.	23
4.4. Pavimento asfáltico reciclado (RAP).....	24
4.4.1. Ventajas y Desventajas del RAP.....	24
4.5. Rejuvenecedores	25
4.5.1. Rejuvenecedores utilizados en la industria del asfalto	26
4.6. Mezclas asfálticas recicladas	26
4.6.1. Mezcla asfáltica reciclada en caliente.....	27
5. Metodología	29
6. Resultados	34

6.1 Etapa 1: Producción y disponibilidad del Aceite de Cocina Usado (WCO).....	34
6.2 Etapa 2: Selección de los artículos científicos y la normativa colombiana de infraestructura vial vigente.....	41
6.3 Etapa 3: Rangos y metodología adecuada para la incorporación del aceite residual de cocina (WCO) como rejuvenecedor en el RAP.....	47
6.3.1 Método de Incorporación del WCO como rejuvenecedor en el RAP.....	48
6.3.2 Rangos del contenido de aceite.....	52
6.4 Etapa 4: Identificación del efecto de la composición del aceite residual de cocina sobre las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP.....	57
6.5 Etapa 5: Establecimiento de la metodología adecuada para la preparación de un nuevo pavimento incorporando RAP rejuvenecido con aceite residual de cocina.....	59
6.5.1 Definición de la mezcla que se va a utilizar	61
6.5.2 Caracterización de los agregados para mezclas MDC	62
6.5.3 Preparación de probetas	63
6.5.4 Preparación de la mezcla	63
6.5.5 Compactación de las probetas en el ensayo Marshall.....	64
6.5.6 Determinación de la gravedad específica bulk	65
6.5.7 Prueba de estabilidad y flujo.....	65
6.5.8 Análisis de densidades y vacíos.....	66
6.5.9 Criterios para una mezcla de pavimentación satisfactoria	66
7. Conclusiones.....	67
Referencias.....	69

Lista de tablas**Pág**

Tabla 1. <i>Clasificación de las mezclas asfálticas.....</i>	21
Tabla 2. <i>Producción de aceite de palma crudo por zonas en Colombia</i>	35
Tabla 3. <i>Ecuaciones de búsqueda</i>	42
Tabla 4. <i>Parámetros de filtrado y criterios de selección</i>	43
Tabla 5. <i>Condiciones de mezcla.....</i>	50
Tabla 6. <i>Porcentaje óptimo de WCO</i>	52
Tabla 7. <i>Resumen del efecto del WCO sobre las propiedades físicas y químicas en la búsqueda bibliométrica</i>	58
Tabla 8. <i>Adaptación de la tabla 450-6 del art. 450-13.....</i>	62
Tabla 9. <i>Adaptación de la tabla 450-10 del art. 450-13.....</i>	66

Lista de figuras

	Pág
Figura 1. <i>Perfil típico de una estructura de pavimento flexible</i>	18
Figura 2. <i>Etapas de la metodología</i>	29
Figura 3. <i>Punto limpio metropolitano de la AMB</i>	37
Figura 4. <i>Punto limpio centro comercial Megamall</i>	38
Figura 5. <i>Punto limpio Alcaldía de Bucaramanga</i>	38
Figura 6. <i>Punto limpio Cajasan</i>	39
Figura 7. <i>Punto limpio UDES</i>	39
Figura 8. <i>Punto limpio UIS</i>	40
Figura 9. <i>Documentos publicados por año</i>	44
Figura 10. <i>Documentos clasificados por tipo</i>	45
Figura 11. <i>Documentos por país o territorio</i>	46
Figura 12. <i>Método de incorporación vs. Número de artículos</i>	49
Figura 13. <i>Porcentaje óptimo WCO según los artículos</i>	56
Figura 14. <i>Metodología sugerida para añadir el WCO</i>	56
Figura 15. <i>Métodos usados para el diseño de la mezcla asfáltica</i>	61

Resumen

En el presente trabajo se realizó un análisis teórico sobre la disponibilidad del aceite residual de cocina (WCO) y su efecto rejuvenecedor en las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP para la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), para esto se plantearon 5 etapas. En la primera etapa se determinó que el AMB dispone de 21 mil litros mensuales de WCO que podría aprovecharse como rejuvenecedor; en la segunda etapa se seleccionaron y analizaron mediante una revisión sistemática de literatura (SLR), 22 artículos de investigación y la norma INVÍAS necesaria para dar cumplimiento al objetivo; en la tercera etapa se determinó que el método adecuado para incorporar el WCO como rejuvenecedor del RAP era el de mezcla, bajo unas condiciones de temperatura a 145°C, tiempo de mezcla de 40 min y velocidad de mezcla de 1700 rpm, asimismo se sugirió utilizar este rejuvenecedor en mínimo tres valores, 3% 6% y 9%; en la cuarta etapa se determinó el efecto del WCO en las propiedades físicas (penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y viscosidad) y químicas del asfalto, teniendo en cuenta el contenido de SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas, Asfáltenos); por último, en la quinta etapa se estableció la metodología adecuada para la preparación de nuevos pavimentos mediante la metodología de Marshall, donde los porcentajes usados en la mezcla que se establecieron son asfalto del 2% al 5%; WCO de 3% al 9% y RAP del 20%.

Palabras Clave: Rap rejuvenecido, Pavimentos asfálticos reciclados (RAP), Rejuvenecedor, aceite residual de cocina (WCO), efectos del WCO en el RAP, propiedades físicas y químicas del RAP.

Abstract

In this work, a theoretical analysis was carried out on the availability of waste cooking oil (WCO) and its rejuvenating effect on the physical and chemical properties of asphalt contained in the RAP for the preparation of new hot asphalt mixtures in the Metropolitan Area of Bucaramanga (AMB), for which 5 stages were proposed. In the first stage, it was determined that the AMB has 21 thousand liters per month of WCO that could be used as a rejuvenator; in the second stage, 22 research articles and the INVÍAS standard necessary to meet the objective were selected and analyzed by means of a systematic literature review (SLR); in the third stage, it was determined that the adequate method to incorporate WCO as a RAP rejuvenator was the mixing method, under conditions of temperature at 145°C, mixing time of 40 minutes and mixing speed of 1700 rpm; it was also suggested to use this rejuvenator in at least three values, 3%, 6% and 9%; In the fourth stage, the effect of WCO on the physical (penetration, softening point, ductility and viscosity) and chemical properties of the asphalt was determined, taking into account the SARA content (Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes); finally, in the fifth stage, the adequate methodology was established for the preparation of new pavements using the Marshall methodology, where the percentages used in the mixture were established as asphalt from 2% to 5%; WCO of 3%, 6% and 9% and RAP of 20%.

Keywords: Rejuvenated Rap, recycled asphalt pavement (RAP), rejuvenator, waste cooking oil (WCO), effects of WCO on RAP, physical and chemical properties of RAP.

Abreviaciones

AMB – Área Metropolitana de Bucaramanga

CA – Cemento Asfáltico

HMA – Hot Mix Asphalt (Mezcla asfáltica en caliente)

PG – Performance grade (Grado de rendimiento)

SLR – Systematic Literature Review (Revisión sistemática de literatura)

SARA – Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos

RAP - Reclaimed Asphalt Pavement (Pavimento asfáltico reciclado)

WCO - Waste cooking oil (aceite residual de cocina)

Introducción

Hoy en día la pavimentación de carreteras es una prioridad en el desarrollo de las ciudades a nivel mundial. El crecimiento acelerado de la ciencia y la tecnología incentiva cada vez más a desarrollar tecnologías de apoyo para producir pavimentos sostenibles con el uso de materiales alternativos en la industria de la pavimentación. El pavimento asfáltico reciclado (RAP por sus siglas en inglés) surge como una alternativa tecnológicamente viable y sostenible, en el cual estos materiales del RAP que se obtienen generalmente del fresado o de trozos de demolición del pavimento asfáltico, se combinan con materiales nuevos y un agente rejuvenecedor para producir mezclas HMA diseñadas correctamente según los criterios de las normas. [1], [2]

Sin embargo, el uso de materiales RAP en las mezclas asfálticas puede crear algunos problemas de durabilidad a corto y largo plazo debido a la presencia de ligantes asfálticos envejecidos. Como también, puede dar lugar a algunas molestias permanentes como: formación de surcos, ahuecamientos y grietas, que provocan un cambio en sus propiedades físicas y químicas. [2], [3] [4] [5]

Por tanto, en esta investigación, el aceite residual de cocina (WCO por sus siglas en inglés) se asumió como posible rejuvenecedor del asfalto contenido en el RAP, el cual, permite mejorar las propiedades del asfalto envejecido dentro de un pavimento viejo a un nivel similar al del asfalto virgen. De esta forma, no solo se mejoran estas propiedades, sino que también, el reciclado del WCO reduce el impacto ambiental que se genera cuando se desecha en los rellenos sanitarios, a través del desagüe (ya que la mayoría de las veces este aceite se suele verter en el lavaplatos) y cuando se vierte en los ríos de forma ilegal. [6], [7], [8]

Las investigaciones realizadas en la búsqueda bibliométrica han demostrado que el uso del rejuvenecedor en el ligante de asfalto envejecido puede alcanzar los grados de rendimiento (PG

por sus siglas en inglés) objetivo cuando se alcanza el porcentaje óptimo de rejuvenecedor. El-Shorbagy et al., [3] descubrió que el efecto de la WCO en el asfalto contenido en el RAP requería un 2% de WCO para alcanzar el valor de penetración del grado de aglutinante objetivo, mientras que requería un 3,5% de WCO para alcanzar el punto de reblandecimiento. De forma similar, Dokandari et al., [5] definió el contenido óptimo como 5,1% para conseguir un ligante rejuvenecido con el mismo valor de penetración del ligante virgen 50/70. Por su parte, Guduru et al., [9] en los resultados sugiere que en las dosis de 5,5% y 11,3%, el WCO es capaz de reducir la viscosidad de la mezcla de asfalto RAP y mejorar las demás propiedades físicas.

Asimismo, el uso de RAP en la producción de nuevas mezclas asfálticas se ha limitado a porcentajes bajos (15-25%) en muchos países. En Colombia, el porcentaje máximo que se puede utilizar de RAP es del 40% según lo reglamentando por el INVÍAS. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones afirmaron que se pueden utilizar porcentajes más altos de RAP añadiendo rejuvenecedores, que restauran las propiedades del ligante original alterando la proporción de asfáltenos a máltenos y compensando el efecto de endurecimiento del ligante envejecido. [6], [8]

Con el fin de incentivar el uso de materiales reciclados para la preparación de nuevas HMA en el Área Metropolitana de Bucaramanga, este proyecto pretende realizar un análisis teórico sobre la disponibilidad del WCO y su efecto rejuvenecedor en las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP para la preparación de pavimentos sostenibles.

Para lograr esto, primero se identificaron los rangos y el método de incorporación del WCO como rejuvenecedor en el RAP; posteriormente se analizó el efecto que este generaba sobre las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP. Y finalmente, se estableció la metodología adecuada entre el Método Marshall y el Método Superpave, para la preparación de un nuevo pavimento sostenible que incorpore el RAP rejuvenecido con WCO.

1. Formulación del Problema

Los pavimentos asfálticos o flexibles son el tipo de vía más utilizado a nivel mundial y se definen como una estructura horizontal capaz de soportar las cargas transmitidas, garantizando condiciones favorables de durabilidad, economía, seguridad, confort de rodadura y sostenibilidad, entre otras. A pesar de sus ventajas, los pavimentos asfálticos sufren de una serie de mecanismos de deterioro, como el envejecimiento y la deformación permanente, que han sido atribuidos principalmente a la pérdida de volátiles y la oxidación. El ligante de asfalto envejecido tiene una mayor viscosidad y es más rígido que el ligante de asfalto virgen, así como otros cambios notables en su composición que pueden dar lugar a una pérdida de adherencia en presencia de humedad y fragilidad [6].

Asimismo, durante el período de servicio de los pavimentos, la mezcla asfáltica experimenta diversas condiciones climáticas y cargas repetidas, lo que podría dar lugar a algunas molestias permanentes, como formación de surcos, enrarecimientos, grietas, que a su vez generan efectos sociales, económicos y ambientales, tales como: Inseguridad vial, alta tasa de accidentalidad, desvalorización, rehabilitación y/o mantenimiento de las vías que influyen en el gasto de recursos no renovables y producción de escombros; éste es uno de los principales desafíos a los que se enfrentan las industrias del pavimento en los últimos decenios [2], [10]

En este sentido, una posible alternativa para la reconstrucción y mantenimiento de vías es el uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) como materia prima para sustituir los materiales convencionales en las mezclas asfálticas en caliente [11]. El uso del RAP en la mezcla asfáltica en caliente (HMA) tiene beneficios económicos y ambientales, ya que disminuye el costo de la construcción, reduce los costos de transporte de materiales y promueve la sostenibilidad [12].

A pesar de las ventajas económicas y ambientales que tiene el uso de RAP, entre sus desventajas se encuentra la gran rigidez del asfalto envejecido en el RAP, el cual causa problemas tales como una menor trabajabilidad y resistencia a la fatiga y al agrietamiento [13]. Por lo tanto, con el fin de utilizar un porcentaje de reemplazo de RAP superior al 20%, es necesaria la adición de sustancias “rejuvenecedoras” que permita restablecer las propiedades físicas y químicas del asfalto envejecido [12].

Estudios recientes han demostrado que el aceite residual de cocina tiene un excelente potencial como rejuvenecedor del asfalto reciclado en las mezclas en caliente. De esta forma, el aceite se puede aprovechar como un material sostenible y se reduce el impacto ambiental causado cuando se desecha en los rellenos sanitarios y a través del desagüe [7].

Aunque se han realizado estudios previos en países como Canadá donde se ha incorporado hasta un 100% del RAP con rejuvenecedores como el aceite de cocina [7], se evidencia la necesidad de realizar un análisis teórico sobre la disponibilidad del aceite residual de cocina y su efecto rejuvenecedor en las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP para la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Realizar un análisis teórico sobre la disponibilidad del aceite residual de cocina y su efecto rejuvenecedor en las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP para la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

2.2 Objetivos Específicos

- 1) Determinar la disponibilidad del aceite en el Área Metropolitana de Bucaramanga.
- 2) Identificar los rangos y la metodología adecuada para la incorporación del aceite residual de cocina como rejuvenecedor en el RAP.
- 3) Identificar el efecto de la composición del aceite residual de cocina sobre las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP.
- 4) Establecer la metodología adecuada para la preparación de un nuevo pavimento incorporando RAP rejuvenecido con aceite residual de cocina.

3. Justificación

Este proyecto busca elaborar una propuesta metodológica para preparar pavimentos en el área metropolitana de Bucaramanga incorporando dos residuos, el aceite residual de cocina (WCO) y el RAP. Estos pavimentos sostenibles podrían disminuir los costos de la materia prima en la rehabilitación de pavimentos, mitigar la contaminación generada por los escombros del pavimento asfáltico y los problemas ambientales generados por el vertimiento ilegal de aceite residual de cocina en ríos y vertederos.

El uso del WCO como rejuvenecedor de pavimentos es una de las posibles soluciones ecológicas ya que contiene componentes similares de aceite más ligeros del asfalto. El WCO se produce generalmente después de las actividades de cocción y fritura, “Cada año, los mercados de alimentos generan una cantidad masiva de WCO (Organización mundial de aduanas): China genera 826 millones de galones, Estados Unidos genera 3 millones de galones, y otros países producen aún más.” [7].

Con respecto al RAP, el reciclaje en los materiales de ligantes asfálticos puede ser una fuente de la conversión de los materiales de desecho en materiales sostenibles, ya que se encuentra frecuentemente como un material de desecho contaminante en los vertederos y ríos de la industria alimentaria, lo que trae implicaciones nocivas para el medio ambiente y la salud humana. También, causa problemas en las redes de saneamiento y sobrecostos en las Estaciones depuradoras de agua residuales (EDAR), por lo que es una práctica que se debe evitar, mediante una correcta gestión.

Por lo tanto, en este proyecto se busca salvaguardar los recursos naturales para la protección del medio ambiente a favor de las presentes generaciones sin olvidar las futuras. Las posibles reducciones en los costos de construcción y las emisiones ambientales harán que esta sea una alternativa atractiva para las agencias de carreteras.

La población de Bucaramanga y su área metropolitana se beneficiarán directamente con esta investigación, ya que se abrirán las puertas a la realización de estos nuevos pavimentos sostenibles, ya que contar con calles y otros espacios pavimentados significa propiciar el desarrollo de las ciudades o poblaciones. El pavimento sostenible permite la accesibilidad y movilidad en dichas zonas, lo cual trae beneficios como un mayor flujo de mercancías, visitantes, la práctica de nuevas actividades relacionadas con el comercio y la generación de más recursos económicos.

4. Estado del Arte

El estado del arte, que se presenta a continuación, permite conocer los conceptos y teorías fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

Se inicia con la definición del pavimento flexible con el fin de comprender el tipo y la estructura interna del pavimento. Asimismo, se presentan las funciones principales de la capa

asfáltica del pavimento. Teniendo en cuenta que estas se componen por mezclas asfálticas, posteriormente se definirá el tipo de material o ligante asfáltico necesario para unir los materiales granulares.

De manera que, el cemento asfáltico se presenta como el tipo de asfalto utilizado para la fabricación de mezclas asfálticas en Colombia. Asimismo, se caracterizan las propiedades físicas a partir de los ensayos de laboratorio por el INVÍAS y a través del grado de rendimiento (PG por sus siglas en inglés).

Después, se mencionan los tipos y propiedades de las mezclas asfálticas y se hace énfasis en la mezcla asfáltica en caliente. Seguidamente, se definen los 4 principales mecanismos de daños de las mezclas asfálticas que se deben tener en cuenta en el diseño de los pavimentos, haciendo énfasis en el factor del envejecimiento. Por otro lado, se explica qué es el pavimento asfáltico reciclado (RAP por sus siglas en inglés) y las ventajas y desventajas de usarlo.

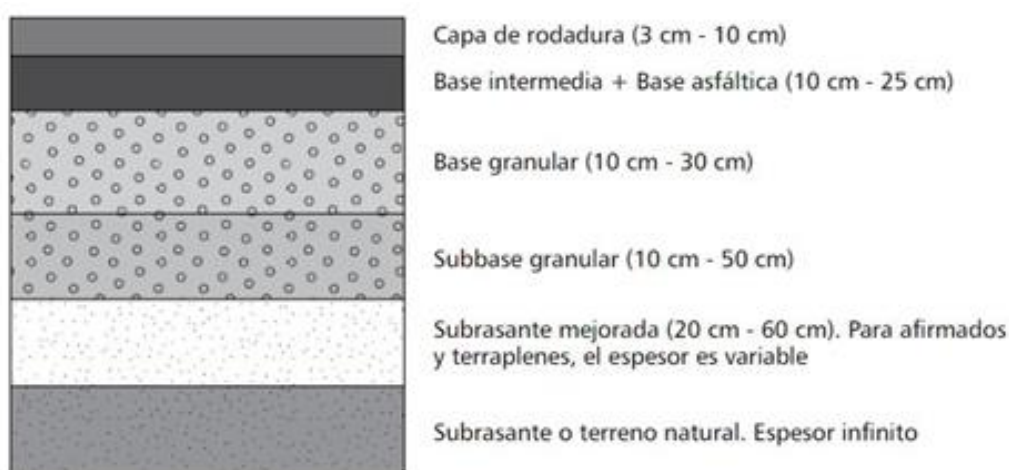
Debido al envejecimiento del RAP, se explican las características de los rejuvenecedores en los ligantes de pavimentos asfálticos. Asimismo, se mencionan los rejuvenecedores que han sido utilizados en la industria del asfalto, haciendo énfasis en el aceite residual de cocina (WCO por sus siglas en inglés).

Finalmente, se define la mezcla asfáltica reciclada, las razones por las cuales se quiere implementar y el tipo de incorporación que se va a utilizar, que en este caso es la mezcla asfáltica reciclada en caliente y en planta. Por lo tanto, se describen cuáles son los controles generales establecidos por la normativa colombiana INVÍAS para la elaboración de estos pavimentos.

4.1. Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles son definidos como estructuras viales que están conformadas en primer lugar por una capa asfáltica que se compone en dos capas: la capa de rodadura y la siguiente capa en la cual está la base intermedia con la base asfáltica que se encuentra apoyada sobre capas de menor rigidez y compuestas por materiales granulares no tratados o ligados, tales como: base, subbase, afirmado y en algunos casos la subrasante mejorada o material de conformación, que a su vez se soportan entre sí sobre el terreno natural o subrasante como se muestra en la figura 1. [14]

Figura 1. Perfil típico de una estructura de pavimento flexible.



Adaptado de “Pavimentos materiales, construcción y diseño”, por [14]

De modo que las principales funciones de la capa asfáltica son [14]:

- Estructural: La capa asfáltica debe estar diseñada y construida de manera que sea resistente a los fenómenos de fatiga, a los efectos del clima y así mismo, resistente a la acumulación de las deformaciones permanentes causadas por las cargas cíclicas vehiculares.

- **Funcional:** La capa asfáltica debe estar diseñada y construida de manera que permita la circulación cómoda y segura de los vehículos durante su vida útil.
- **Impermeabilización:** La capa asfáltica debe impedir la penetración directa del agua a las capas subyacentes, limitando la pérdida de resistencia al corte que pueden experimentar las capas granulares de base y subbase, al igual que la subrasante cuando se incrementa el grado de saturación de los materiales que la conforman.

Hay que mencionar, además, que cada una de las capas que componen la carpeta asfáltica están compuestas por mezclas asfálticas, las cuales a su vez se componen de materiales granulares o pétreos que son seleccionados y que están ligados con un material asfáltico o asfalto, y presentan requisitos mínimos de calidad diferentes en cuanto a su función. [14].

4.2. Ligantes asfálticos

Los ligantes asfálticos son generados por el proceso de destilación del petróleo crudo y se utilizan en los pavimentos para unir los agregados pétreos de manera que la mezcla asfáltica le brinde impermeabilidad, durabilidad y resistencia mecánica a la capa asfáltica bajo carga monotónica, cíclica y/o estática [14].

Uno de estos ligantes es el cemento asfáltico (CA), el cual contiene una baja proporción de compuestos volátiles, posee propiedades aglomerantes y es soluble en tricloroetileno (Artículo 410-13, INVÍAS 2013). Debido a las condiciones climáticas y otros factores a los que se expone este hidrocarburo, sufre cambios en sus propiedades físicas, generando un fenómeno que se conoce como envejecimiento [11].

El cemento asfáltico puede ser caracterizado por los ensayos básicos para medir las propiedades físicas que según el Artículo 400 del INVÍAS-2013 son:

- Penetración (INV E-706): Es usado en los productos bituminosos para medir la consistencia a una temperatura de ensayo. Entre más altos los valores de penetración las consistencias son más blandas. [38]
- Punto de ablandamiento (INV E-712): Es un indicador de la tendencia a fluir del material sometido a altas temperaturas y es útil en la clasificación de los productos bituminosos[38]
- Viscosidad absoluta (INV E-717): Se usa para medir la viscosidad aparente del asfalto a las temperaturas de aplicación. Además, sirve para determinar la manejabilidad, así como la facilidad de bombeo en la planta asfáltica. [38]
- Ductilidad (INV E-702): Se usa para establecer si el producto ensayado cumple la especificación correspondiente, brinda una medida de las propiedades de los materiales bituminosos sometidos a tensión. Generalmente, un asfalto de baja ductilidad tendrá un deficiente comportamiento en servicio y presentará pobres propiedades adhesivas. [38]

Además, según Rondón y Reyes [14]., otra forma de caracterización que se utiliza en países desarrollados es el grado de funcionamiento o grado de desempeño (PG por sus siglas en inglés), el cual, viene acompañado de un rango de valores que delimitan las temperaturas máxima y mínima de servicio a la cual puede ser sometido el ligante asfáltico dentro de la mezcla.

En Colombia se exige la producción industrial de 3 tipos de cemento asfáltico [14].:

- CA 80-100 (mínimo PG 58-22): Utilizado en zonas con temperaturas medias anuales promedios inferiores a 24°C.

- CA 60-70 (mínimo PG 64-22): Utilizado en zonas con temperaturas medias anuales promedios superiores a 24°C, además se recomienda en el caso de altos volúmenes de tránsito.
- CA 40-50 (mínimo PG 64-22): Utilizado en zonas con temperaturas medias anuales promedios superiores a 24°C, además se recomienda en el caso de altos volúmenes de tránsito.

4.3. Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas son la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico, también reciben el nombre de aglomerantes y se emplean en la construcción de pavimentos de manera que aquéllos quedan cubiertos por una película continua. Generalmente, estas mezclas se elaboran en plantas mezcladoras o en unas centrales fijas, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan; aunque en algunos casos pueden fabricarse in situ [14].

Para clasificar y establecer las diferencias entre las distintas mezclas asfálticas existen varios parámetros de acuerdo a la composición, al uso, a la temperatura y al diseño que se quiere implementar. De forma que se dividen, así como lo muestra la tabla 1 [15]:

Tabla 1. *Clasificación de las mezclas asfálticas*

Parámetro de clasificación	Tipo de mezcla
Fracción de árido empleadas	Masilla
	Mortero
	Hormigón
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frío
	En caliente
Huecos en mezcla (h)	Cerradas ($h < 6$ por 100)
	Semicerradas ($6 \text{ por } 100 < h < 12$ por 100)
	Abiertas ($h > 12$ por 100)
	Porosas ($h \text{ por } 100 > 20$ por 100)
Tamaño máximo del árido (t máx)	Gruesas (t máx > 10 mm)
	Finas (t máx < 10 mm)
Estructura del árido	Con esqueleto mineral

Parámetro de clasificación	Tipo de mezcla
Granulometría	Sin esqueleto mineral
	Continuas
	Discontinuas

Nota: Esta tabla muestra los parámetros de clasificación de las distintas mezclas asfálticas. Adaptado de [15]

En síntesis, el tipo de mezcla más utilizado de la tabla 1 se encuentra en el parámetro de clasificación de temperatura de puesta en obra, denominada como mezcla asfáltica en caliente, la cual, se caracteriza por la combinación de un ligante asfáltico, un agregado pétreo de granulometría continua o discontinua, polvo mineral y en ocasiones algunos tipos de modificantes y aditivos; mezclados en condiciones altas de temperatura para lograr el recubrimiento total de la película de asfalto sobre el material. Por lo cual, las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla. [17]

4.3.1 Propiedades de las mezclas asfálticas

Para definir cuáles son las principales propiedades de las mezclas asfálticas es necesario considerar que estas mezclas deben ser capaces de proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética para los vehículos. Asimismo, que estas mezclas sean capaces estructuralmente de soportar la mayor parte de las solicitaciones del tráfico, de forma que lleguen en menor proporción a las capas inferiores. Es por eso que las principales propiedades que se desean en las mezclas son [14].:

- Resistencia a las deformaciones permanentes, a la fatiga, al deslizamiento, al envejecimiento, a las condiciones ambientales y; a la resistencia bajo carga monotónica a tracción (estabilidad).

- Impermeabilidad.
- Durabilidad.
- Trabajabilidad.
- Economía.

4.3.2 Mecanismos de daño de mezclas asfálticas para el diseño.

Rondón y Reyes [14]. mencionan los principales mecanismos de daño en las mezclas asfálticas en servicio y que, en el diseño del pavimento, se deben tener en cuenta:

- Ahuellamiento: Es la deformación vertical permanente que se acumula en el pavimento debido al paso repetitivo de los vehículos, a los factores de carga, ambientales y de mezcla [14].
- Fatiga: Es un fenómeno que se produce en las estructuras flexibles cuando la zona inferior de la capa asfáltica presenta elevados valores de deformación a tracción debido a las cargas repetidas [14].
- Daño por humedad: Es la pérdida de la cohesión (resistencia entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo) de la mezcla causada por la humedad que genera el aumento de la deformación permanente. [14].
- Envejecimiento: El principal mecanismo del envejecimiento es la pérdida de volátiles y la oxidación. Se puede encontrar de 2 formas, el envejecimiento a corto plazo (durante la mezcla y la construcción) y el envejecimiento a largo plazo (durante su vida útil en el pavimento) [14].

Asimismo, el pavimento envejecido tiene una mayor viscosidad y es más rígido que el cemento asfáltico fresco, que en presencia de humedad y fragilidad pueden dar lugar a una pérdida de adherencia. [6].

Según Rondón y Reyes [14]. Los 6 factores del envejecimiento más importantes son: la oxidación, la volatilización, la polimerización, la tixotropía, la sinéresis y la separación.

4.4. Pavimento asfáltico reciclado (RAP)

Según el INVÍAS, en Colombia para el mantenimiento de carreteras, la incorporación del pavimento asfáltico reciclado (RAP por sus siglas en inglés) en nuevos pavimentos es una técnica que es viable y económica debido a la opción de reutilizar los materiales de las carreteras que están disponibles una vez cumplieron su vida útil. Con esta técnica del RAP se obtiene un material a partir del fresado de las carpetas asfálticas y estos residuos se pueden transportar a un lugar de disposición temporal hasta que se necesiten para ser reutilizados en nuevos pavimentos o en rehabilitaciones viales.

4.4.1. Ventajas y Desventajas del RAP.

El uso del RAP en el asfalto de mezcla en caliente (HMA por sus siglas en inglés) disminuye el costo de la construcción, reduce los costos de transporte de materiales y promueve la sostenibilidad. Entre sus ventajas más importantes se encuentra el ahorro energético, ahorro económico, disminución de desechos y buen desempeño de los materiales [12].

A su vez, los principales beneficios ambientales asociados con el uso del RAP incluyen [14] :

- Reducción de las emisiones y del uso de combustible/energía.
- Reducción de los costos de producción.
- Conservación de los recursos no renovables.
- Conservación de los valiosos espacios de vertederos. Las mezclas de asfalto que contienen RAP también podrían proporcionar algunos beneficios técnicos.

El uso de materiales de RAP en las mezclas de asfalto también podría tener algunas desventajas relacionadas principalmente con el rendimiento de las mezclas que contienen RAP. Sin embargo, este problema puede abordarse mediante el fraccionamiento del RAP en diferentes tamaños [12].

4.5. Rejuvenecedores

Los rejuvenecedores o el llamado rejuvenecimiento de pavimentos está diseñado para restablecer las características originales de los ligantes de pavimento asfáltico que se encuentran envejecidos (oxidados). Estos rejuvenecedores son usados para ablandar el ligante envejecido y crear un rejuvenecimiento de amplio espectro que reponga los volátiles y aceites dispersantes. A su vez, que promuevan la adhesión y restablezcan la proporción original de asfáltenos a máltenos, de tal manera que el rejuvenecimiento sea altamente aromático y sea capaz de mejorar tanto la susceptibilidad a la temperatura como la susceptibilidad al endurecimiento del pavimento asfáltico envejecido [6].

Según la norma INVÍAS en el artículo 462-13, el agente rejuvenecedor usado para reciclado debe ser un material orgánico que tenga características químicas y físicas que ayuden a devolverle al asfalto envejecido la calidad necesaria para asegurar el buen comportamiento de la nueva mezcla.

4.5.1. Rejuvenecedores utilizados en la industria del asfalto

En la industria del asfalto han utilizado algunos rejuvenecedores para mejorar las propiedades químicas y físicas de los aglutinantes y mezclas de asfalto. Algunos ejemplos de rejuvenecedores utilizados en la industria del asfalto son los extractos aromáticos, aceite de soja, aceite de maíz, gasolina, bio-aceite de desechos de madera y aceite residual de cocina (WCO por sus siglas en inglés) [2]

El WCO generalmente se produce después de las actividades de cocción y fritura y se puede usar como un buen rejuvenecedor debido a que tiene componentes de aceite de asfalto más livianos [7].

4.6. Mezclas asfálticas recicladas

El principal objetivo de los materiales o mezclas asfálticas convencionales es restituir las propiedades originales. Para incorporar el RAP en las mezclas asfálticas existen diversas maneras: In situ o “en el lugar” que en este caso puede ser en caliente o en frío, en el cual se utilizan equipos de compactación autopropulsados como máquinas que realizan todas las operaciones de manera consecutiva: fresado, mezclado, extendido y en algunos casos la pre-compactación del material.

El otro tipo de reciclado es en Planta o “fuera del sitio” que en este caso tiene tres variantes posibles: en caliente, frío o tibio [16].

El más utilizado es la mezcla asfáltica en caliente y en planta, puesto que, los ligantes utilizados pueden ser de diferente consistencia (convencionales o modificados) con la posible adición de agentes rejuvenecedores para lograr la reactivación del asfalto envejecido de la mezcla [16].

4.6.1. Mezcla asfáltica reciclada en caliente

En estas mezclas el ligante que se utiliza es el cemento asfáltico y por ende se debe extender y compactar a alta temperatura. En Colombia estas mezclas se caracterizan a través de la especificación INVÍAS (2013, artículo 462-13) y deben cumplir con los requisitos mínimos de calidad que se exponen en la tabla 450 – 3 del artículo 4 del INVÍAS,2013 [37]

Por otra parte, se debe tener en cuenta que estas mezclas se diseñan por el método Marshall (AASHTO T 245, INV. E-748-13) [38], y el material se diseña a partir de criterios como el tamaño máximo del agregado pétreo que debe ser inferior a 1” (25 mm). Además, la masa de la mezcla final del material reciclado no debe exceder el 40%. Los criterios más específicos para el diseño y verificación de esta mezcla preliminar por el método Marshall se definen en la tabla 450 -10 y 450 -11 del artículo 4 del INVÍAS,2013 [37]

Adicionalmente, otros controles generales a tener en cuenta durante la elaboración de mezclas asfálticas recicladas en caliente se especifican a continuación.

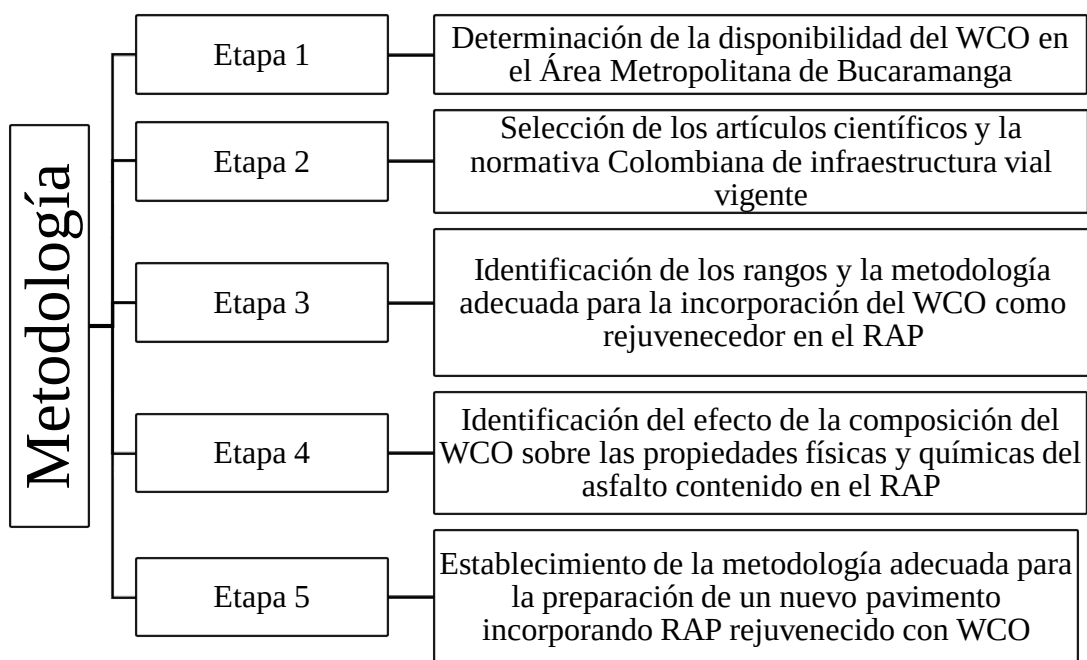
- El rejuvenecedor que se va a utilizar para el reciclado debe ser un material orgánico que permita restituir las condiciones necesarias al asfalto envejecido para el buen comportamiento de la mezcla, según lo contemplen las especificaciones particulares del proyecto (Art. 462.2.3, 2013) [37]
- En el reciclado de pavimentos en caliente la planta mezcladora del asfalto debe poseer las modificaciones técnicas que permitan la elaboración de estas mezclas, de manera que el RAP, el asfalto nuevo y el agente rejuvenecedor no sufran deterioros (Art. 462, 2013) [37]
- El material disgregado por reciclar se debe tratar y mezclar para su homogenización y correcta descontaminación. Por lo tanto, es indispensable que se trituren todos los bloques de acuerdo con las especificaciones de la norma (Art. 462.2.1.2, 2013) [37]
- La mezcla se debe diseñar por el método Marshall cumpliendo con los criterios de diseño y demás controles como la susceptibilidad al ahuellamiento y a la humedad (Art. 462.4.5, 2013) [37]
- El tipo y la proporción del agente rejuvenecedor para reciclado que se debe incorporar en la mezcla está determinado según la norma de ensayo INV. E-812-13 [39]

En síntesis, estos conceptos ayudan a presentar de manera más clara la información científica que existe sobre el tema principal de la investigación. A continuación, se presentan las etapas que se van a llevar a cabo para el desarrollo de la investigación y posteriormente se presentan los resultados encontrados en dichas etapas.

5. Metodología

Esta investigación se desarrolló mediante un estado del arte que se enmarcó dentro de los conceptos de tipo explicativo, descriptivo, analítico y proyectivo, ya que se centró en realizar un análisis teórico sobre la disponibilidad del aceite residual de cocina y su efecto rejuvenecedor en las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP para la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Para esto se dividió en las siguientes etapas (Figura 2):

Figura 2. *Etapas de la metodología*



Fuente: Autoría propia.

Etapas 1: Determinación de la disponibilidad del aceite en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

Esta etapa dio cumplimiento al objetivo específico 1

Se realizó la búsqueda de la información en periódicos locales, trabajos de grado de las universidades de la región, documentos gubernamentales, entre otros; con el fin de conocer la producción y disponibilidad del aceite residual de cocina en los últimos 5 años.

Para recopilar la información necesaria, se siguieron los siguientes pasos:

- Selección de palabras claves: Para la búsqueda de la información se establecieron las palabras claves de acuerdo con el objetivo de esta investigación.
- Selección del motor de búsqueda y material informativo: La revisión de la información se realizó utilizando motores de búsqueda tales como: Google Chrome, Internet Explorer, Microsoft Edge, Mozilla Firefox, entre otros. Se utilizó las herramientas para realizar un ajuste a la búsqueda donde se filtró por país, idioma, periodo de tiempo en el que el contenido fue publicado, entre otros detalles. Así mismo se realizaron búsquedas de frases exactas haciendo uso de las comillas para afinar el resultado.
- Selección de la información pertinente: A partir de la búsqueda de la información realizada, se examinaron las páginas encontradas y se tuvieron en cuenta los datos y cifras acerca del aceite usado en el Área metropolitana de Bucaramanga a partir del año 2015.
- Síntesis: Teniendo en cuenta los datos recolectados, se analizó la información donde se identificaron los puntos de depósito de aceite usado y los sectores involucrados, la cantidad de litros que se produjeron mensualmente y el tipo de aceite utilizado.

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

Esta etapa es un insumo para el cumplimiento del objetivo 2, 3 y 4.

Se realizó un enfoque de Revisión Sistemática de Literatura (SLR), con el fin de analizar los efectos del aceite residual de cocina (WCO) como rejuvenecedor en las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el pavimento asfáltico reciclado (RAP).

Para recopilar sistemáticamente la información necesaria para un análisis exhaustivo, se siguieron los siguientes pasos de acuerdo con las recomendaciones de [2]:

- Definición del problema y selección de palabras claves: Para realizar este paso fue necesario tener claro el objetivo general de esta investigación, en este caso se pretendió realizar un análisis teórico del aceite residual de cocina y su efecto rejuvenecedor en las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP para la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente.
- Selección de las bases de datos y recursos de información: La revisión de literatura se realizó utilizando la base de datos bibliométrica SCOPUS y el motor de búsqueda GOOGLE SCHOLAR para tener acceso a otro tipo de documentos tales como: periódicos locales, trabajos de grado de las universidades de la región, documentos gubernamentales, Normas INVIAS (Instituto Nacional de Vías), entre otros. Se utilizaron operadores booleanos y ecuaciones de búsqueda combinando las siguientes palabras claves: *Reclaimed asphalt pavement* (RAP), *Waste Cooking Oil* (WCO), *Rejuvenating agent*, *Hot mix asphalt* (HMA), *Rejuvenator*.
- Selección de los documentos pertinentes: A partir de la búsqueda de la literatura realizada, se eliminaron los duplicados, se examinaron los títulos y resúmenes de los documentos restantes y se seleccionaron los que se consideraron pertinentes.

Para la selección de los documentos, se utilizaron los siguientes criterios de inclusión: artículos científicos en inglés enfocados en los efectos que generaba el rejuvenecedor WCO en las propiedades del asfalto envejecido publicados entre 2016 hasta 2021. Cabe aclarar que, se excluyeron los artículos que no tuvieron en cuenta los asfaltos envejecidos, los métodos de rejuvenecimiento, otros tipos de rejuvenecedores y artículos publicados antes del año 2016. Asimismo, se revisó la norma INVÍAS para comparar y verificar la información analizada en la investigación.

- Síntesis: Una vez identificados los artículos, se analizaron bibliométricamente con el fin de revisarlos y estudiarlos por año de publicación, por países, por institución, entre otros.

Todo el proceso de selección se completó a partir de la lectura exhaustiva de los documentos recopilados y el resumen de las principales ideas y conclusiones relacionadas con este estudio.

Etapas 3: Identificación de los rangos y la metodología adecuada para la incorporación del aceite residual de cocina como rejuvenecedor en el RAP.

Esta etapa dio cumplimiento al objetivo específico 2

A partir de los documentos seleccionados en la Etapa anterior, se determinaron:

1. Métodos de incorporación del WCO como rejuvenecedor en el RAP
2. Rangos óptimos en los que se debe incorporar el WCO
3. Metodología adecuada de incorporación del rejuvenecedor en el asfalto del RAP para la fabricación de nuevos pavimentos en Bucaramanga

Etapla 4: Identificación del efecto de la composición del aceite residual de cocina sobre las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP.

Esta etapa dio cumplimiento al objetivo específico 3

A partir de los documentos seleccionados en la Etapa 2, se identificó el efecto de la composición del aceite residual de cocina sobre las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP.

Por otra parte, se determinó el efecto del WCO sobre la composición del asfalto teniendo en cuenta el contenido de SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas, Asfáltenos).

Etapla 5: Establecimiento de la metodología adecuada para la preparación de un nuevo pavimento incorporando RAP rejuvenecido con aceite residual de cocina.

En esta etapa se dio cumplimiento al objetivo específico 4

A partir de los documentos y normativas seleccionados en la Etapa 2, se estableció la metodología adecuada para la preparación de un nuevo pavimento incorporando RAP rejuvenecido con aceite residual de cocina.

De acuerdo con los artículos seleccionados, se determinó el rango de contenido adecuado del asfalto rejuvenecido con el WCO contenido en el RAP para la preparación de un nuevo pavimento a partir de dos metodologías: Método Marshall y Método Superpave.

6. Resultados

6.1 Etapa 1: Producción y disponibilidad del Aceite de Cocina Usado (WCO)

La búsqueda de la información se realizó con las siguientes palabras claves: Disponibilidad de aceite de cocina en Bucaramanga, Colombia productor de aceite, Estadísticas mundiales sobre la producción del aceite, Desempeño regional 2019 - 2020 del aceite de palma y Puntos de recolección de aceite en Bucaramanga.

Según la información recolectada en Google Chrome, hoy en día se dispone de varios tipos de aceites y grasas vegetales que se pueden usar en la cocina tales como: el aceite de linaza, el aceite de sésamo, el aceite de cacahuate, el aceite de oliva, el aceite de girasol, el aceite de lino, el aceite de coco, el aceite de soja y el aceite de palma. Este último, conocido en Colombia como el de mayor producción, proveniente del fruto de palma de aceite y su semilla. Como lo muestra la Central Informativa Sectorial [18] “El principal productor de aceite de palma en América, y el cuarto a nivel mundial es Colombia, según los datos de la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (FEDEPALMA). Esta industria representa el 7% del Producto Interno Bruto (PIB) agropecuario; asimismo, del aceite como su producto principal, puesto que, de la planta también pueden extraerse insumos para la producción de alimentos, jabones, concentrados para animales, pintura, detergentes, cosméticos, biocombustible y tintas para impresión. En el país se tienen sembradas 464.000 hectáreas de palma de aceite, distribuidas en 21 departamentos y 161 municipios”.

Asimismo, es importante conocer la participación por zonas, específicamente la que involucra esta investigación en la producción nacional de aceite de palma. Según el desempeño regional 2016-2019 mostrado en el boletín económico por Fedepalma, se muestra que durante los

tres primeros meses de 2019 todas las zonas reportaron crecimiento en la producción de aceite de palma con respecto al mismo periodo de 2018, aunque en las zonas Centro y Suroccidental de Colombia se reportaron crecimientos superiores al 14% como lo muestra la [tabla 2](#). [19]

Tabla 2. *Producción de aceite de palma crudo por zonas en Colombia*

Zona	Enero - Marzo				Variación 18/19	
	2016	2017	2018	2019	Abs	%
Oriental	147,398	194,152	194,319	203,467	9,148	4,7%
Central	96,605	128,213	131,594	150,639	19,046	14,5%
Norte	65,561	93,912	103,388	103,517	129	0,1%
Suroccidental	6,09	7,766	9,088	11,799	2,711	29,8%
Total	315,654	424,043	438,389	469,423	31,034	7,1%

Nota: *Cifras con corte al 07 de mayo de 2019/ Adaptado de Fedepalma – Sistema de Información Estadística del Sector Palmero, Sispa.

A su vez, el Consumo aparente según Fedepalma para el primer trimestre de 2019 fue de 274.000 toneladas, un aumento del 2 % frente periodo del año anterior 2018 que fue de 268.000 toneladas. En el mundo los aceites vegetales son el segundo grupo de alimentos de mayor consumo después de los cereales y por lo tanto requieren un tratamiento especial. [19]

Sin embargo, según el desempeño regional mostrado en el boletín económico de marzo de 2020 por Fedepalma, la producción registrada en las zonas se comportó de la siguiente manera: - 4,7 % en la Oriental, -5,1 % en la Central, -13,4 % en la Norte y 28,2 % en la Suroccidental. Por ende, la producción a nivel regional en general presentó un comportamiento decreciente en 2019 al compararla con lo registrado en 2018. [20]

Según la Resolución No. 0316 de 2018 del 01 de marzo del 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MINAMBIENTE) “por la cual se establecen disposiciones

relacionadas con la gestión de los aceites de cocina usados y se dictan otras disposiciones”, los productores, comercializadores y distribuidores deben cumplir con el correcto manejo de esta sustancia trabajando junto con los gestores autorizados, puesto que el aceite de cocina quemado o aceite vegetal usado es un residuo altamente contaminante que representa un riesgo para el medio ambiente cuando es arrojado al desagüe y para la salud humana cuando es limpiado y utilizado nuevamente de manera ilegal para el consumo [21].

Actualmente, el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) como Autoridad Ambiental Urbana desarrolla acciones de control y vigilancia y de gestión ambiental orientadas a lograr una gestión integral de los residuos sólidos. De acuerdo con lo establecido por la resolución nombrada anteriormente del MINAMBIENTE y como lo indica el artículo 3 de la misma, el AMB tiene como objeto realizar la inscripción de los generadores industriales, comerciales y de servicios de aceite de cocina usado (WCO) diligenciando el formulario que se encuentra en la página web de la AMB [40].

De igual forma, los inscritos (generadores industriales, comerciales, de servicios y gestores de WCO) deben cumplir con las obligaciones que se establecen dentro de la resolución para la adecuada gestión de los WCO. Por ejemplo, el gestor de WCO después de inscribirse ante las autoridades ambientales competentes en las áreas donde desarrolla sus actividades, debe reportar anualmente ante la autoridad ambiental dentro de los primeros 15 días del mes de enero de cada año, la siguiente información: Nombre o razón social, NIT, Representante legal, Actividad realizada por el gestor, Listado de los generadores industriales, comerciales y de servicios de WCO a los que se les recoge WCO y kilogramos totales de WCO (recolectados, tratados y/o aprovechados durante el periodo correspondiente). Como también, debe expedir constancia al generador industrial, comercial y de servicios de WCO [41].

Es importante resaltar que se deben establecer puntos limpios para que los generadores domiciliarios de WCO dispongan el residuo y las condiciones en las cuales debe permanecer el WCO (debidamente contenido y etiquetado durante el almacenamiento) para evitar derrames o vertimientos. Además, que deben cumplir con la normatividad ambiental y sanitaria que le sea aplicable; y contar con plan de contingencia para el manejo de los WCO [41].

Al año 2019, la empresa Santandereana Grasecol (Grasas ecológicas de Colombia S.A.S) se encontró como el único gestor autorizado por el AMB en Bucaramanga, especializada en la cadena de reciclaje de los WCO a través de la recolección, transporte, almacenamiento y disposición final. Por lo cual, esta empresa se encarga de que se recolecte en la ciudad y de administrar comercialmente su venta al exterior donde se utiliza como materia prima para fabricar biocombustible, ya que en Colombia aún no existe alguna entidad que realice esa transformación [21].

Ahora bien, para la recolección del WCO en la ciudad de Bucaramanga el AMB por medio de una campaña en convenio con Grasecol, impulsó un proyecto desde los “Puntos Limpios” para el depósito del aceite los cuales son [21]:

- Metropolitano de la AMB: Ubicado en la calle 56 con avenida samanes

Figura 3. Punto limpio metropolitano de la AMB



Adaptado de GRASECOL S.A.S

- Centro comercial Megamall: Ubicado en la carrera 33 # 29 - 15 Sótano 1

Figura 4. *Punto limpio centro comercial Megamall*



Adaptado de GRASECOL S.A.S

- Alcaldía de Bucaramanga: Ubicado en la carrera 11 # 34 - 52 Entrada principal 1er piso

Figura 5. *Punto limpio Alcaldía de Bucaramanga*



Adaptado de GRASECOL S.A.S

- Cajasan: Ubicado en la carrera 27 # 61 - 78 Entrada principal supermercado

Figura 6. *Punto limpio Cajasan*



Adaptado de GRASECOL S.A.S

- Universidad UDES: Ubicado en la calle 70 # 55 - 210 Parqueadero principal primer piso

Figura 7. *Punto limpio UDES*



Adaptado de GRASECOL S.A.S

- Universidad Industrial de Santander: Ubicado en la carrera 19 # 35 - 02 Punto verde UIS

Figura 8. *Punto limpio UIS*



Adaptado de GRASECOL S.A.S

Según las dos entidades, mensualmente en la ciudad se recogen 21.000 litros y actualmente 500 restaurantes hacen parte de esta alianza, en la que Grasecol recupera 20 toneladas mensuales [21], [22].

Por otro lado, el AMB junto con Grasecol además de trabajar con restaurantes y distintos entes estipulados en la resolución, está implementando estrategias para que todo el aceite que se genera en la cocina de los conjuntos residenciales de Bucaramanga adapte un espacio en el conjunto como “punto limpio” y recicle el WCO correctamente según las recomendaciones de la capacitación que se les brinda. Si este proceso se lleva de manera correcta, Grasecol se encarga de la recolección y del pago que corresponde a 18.000 pesos colombianos por una cantidad de 20 litros como mínimo. En el año 2019, uno de los primeros sectores en el cual se realizó una prueba piloto fue en el barrio Real de Minas de Bucaramanga [21].

Asimismo, es importante resaltar que para garantizar la posibilidad del posterior tratamiento el aceite debe ser puro, es decir que no esté mezclado con agua solo con grasas animales o vegetales y el aceite no debe tener mal olor sin importar el tiempo en el que fue envasado [21].

De acuerdo con el artículo 462 –13 del INVÍAS, para que el WCO se pueda implementar como posible rejuvenecedor, se debe verificar que es un material orgánico cuyas características químicas y físicas permitan devolverle al asfalto envejecido las condiciones necesarias para el buen comportamiento de la nueva mezcla según lo contemplen las especificaciones particulares del proyecto. Es decir, que el efecto que se genera al añadir WCO en la mezcla de como resultado una mayor penetración y ductilidad, mientras que, el punto de ablandamiento y la viscosidad disminuyan. Asimismo, se puede revisar el contenido de SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos) del asfalto rejuvenecido puesto que la adición del aceite disminuye la proporción de asfáltenos/máltenos sin que esto signifique que la composición se restablece al estado de asfalto virgen [37].

6.2 Etapa 2: Selección de los artículos científicos y la 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: *Reclaimed asphalt pavement (RAP)*, *Waste*

Cooking Oil (WCO), Rejuvenating agent, Hot mix asphalt (HMA), Rejuvenator. En la [tabla 3](#) se muestran las tres (03) ecuaciones utilizadas y el número de registros encontrados de cada ecuación de búsqueda.

Tabla 3. Ecuaciones de búsqueda

Nº	Fecha de consulta dd/mm/aa	Base de datos	Ecuación de búsqueda	Número de registros
1	26/11/2020	SCOPUS	[Rejuvenator OR Rejuvenation OR Recycling Agent OR Waste Oil] AND [Asphalt OR Bitumen OR Reclaimed Asphalt Pavement]	142
2	15/12/2020	SCOPUS	[Implementing OR effects OR methods] AND [Waste Oils with Reclaimed Asphalt Pavement OR Waste cooking oil]	14
3	13/01/2021	SCOPUS	[Pavement OR Asphalt Pavement] [Rejuvenator OR Rejuvenation OR Bio-Oils OR Waste Oils OR Recycling Agent]	170

Nota: En esta tabla se presentan las ecuaciones de búsqueda que se usaron para encontrar los documentos en los que está basado este documento. Fuente. Autoría propia

A partir de los registros encontrados en cada ecuación de búsqueda, se usaron criterios de filtrado que ayudaron a sintetizar los documentos. Por ejemplo, la búsqueda bibliográfica con la primera ecuación dio como resultado un total de 142 documentos. Después de filtrar con el área temática (ingeniería), tipo de documento (artículo y *review*), año (2016 – 2021) y etapa de publicación (final); quedaron 57 documentos para su posterior análisis. Este análisis, se realizó utilizando los criterios de selección que incluyen los artículos relevantes centrados en el objetivo de la investigación para así obtener los documentos finales, los cuales fueron 16.

La [tabla 4](#) muestra los parámetros de filtrado y criterios de selección utilizados en la búsqueda bibliométrica.

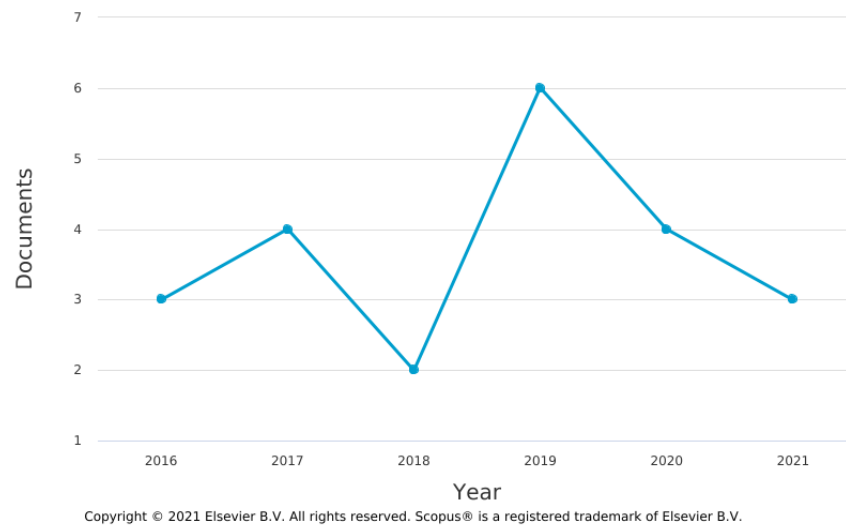
Tabla 4. *Parámetros de filtrado y criterios de selección*

Nº	Criterios de filtrado	Número de registros filtrados	Criterios de selección	Documentos finales
1	Año de publicación: 2016-2021 Área temática: Ingeniería Tipo de documento: Artículo y Review Etapas de publicación: Final	57	Artículos centrados en los efectos de los rejuvenecedores sobre las propiedades de los ligantes envejecidos o de las mezclas asfálticas que contienen RAP	16
2	Año de publicación: 2016-2021 Área temática: Ingeniería Etapas de publicación: Final	9		1
3	Año de publicación: 2016-2021 Área temática: Ingeniería Tipo de documento: Artículo, Review y Conference paper Etapas de publicación: Final	83		5

Nota: Esta tabla presenta los criterios de filtrado usados en la búsqueda, y el número de documentos que finalmente se escogieron. Fuente. Autoría propia

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 22 documentos, los cuales fueron resultado de las ecuaciones de búsqueda de los documentos relacionados y la eliminación de los duplicados.

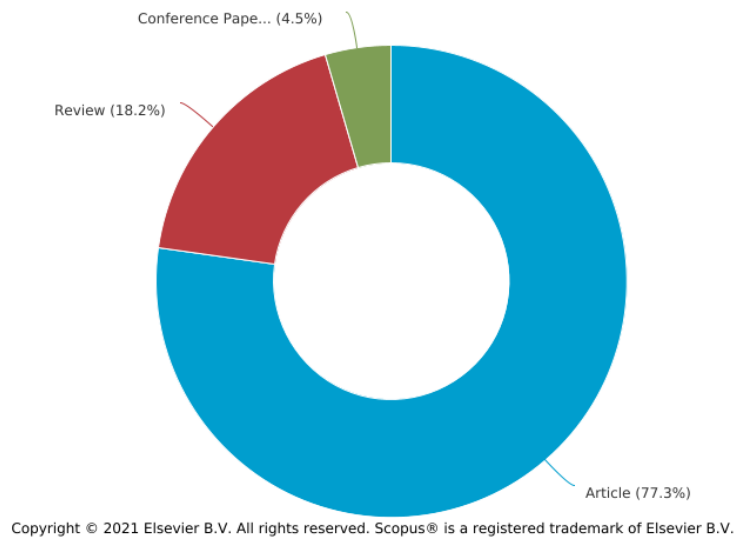
Posteriormente, se analizaron bibliométricamente por medio de gráficas. En la [figura 9](#) se muestran los documentos publicados por año sobre este tema de investigación.

Figura 9. Documentos publicados por año

Fuente. Autoría propia. Base de datos: Scopus

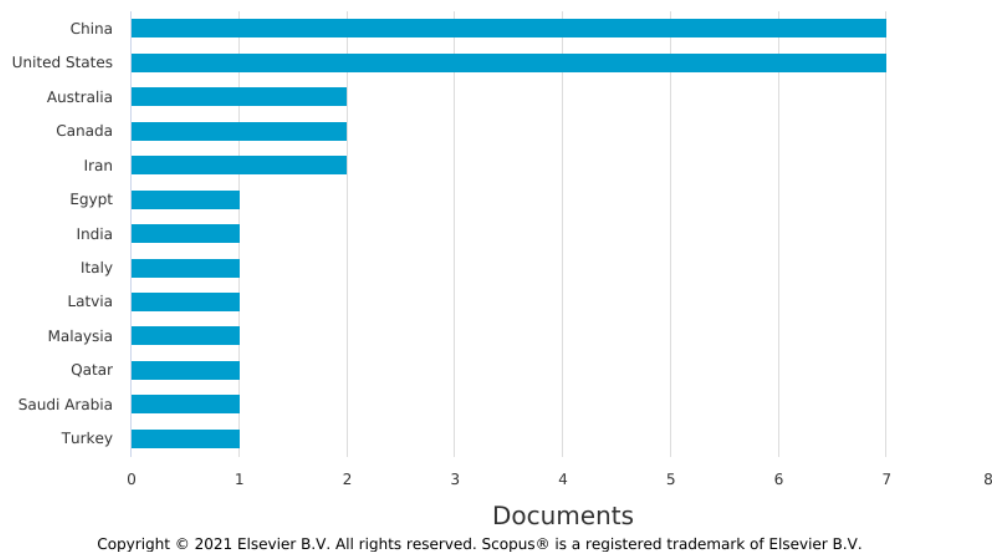
Asimismo, en la [figura 9](#) se puede evidenciar que durante los periodos 2017-2018 y 2019-2020 han disminuido el número de publicaciones en 2 artículos científicos relacionados con el rejuvenecimiento en los pavimentos. Mientras que, durante el período 2018-2019 aumentó considerablemente. Ahora bien, el decrecimiento presentando en el periodo 2020-2021 se da porque actualmente (año 2021) solo se han registrado 3 publicaciones en lo que va del año (última búsqueda 13/01/2021).

En la [figura 10](#) se observa la clasificación de la información por tipo de documento y en definitiva el tipo de documento más utilizado en este tema de investigación fueron los artículos de investigación, con un porcentaje de 77.3 %. Y el menos utilizado, son *conference papers* con un porcentaje de 4.5 %.

Figura 10. Documentos clasificados por tipo

Fuente. Autoría propia. Base de datos: Scopus

Por otro lado, como se muestra en la [figura 11](#), solo se están comparando 13 países que registran documentos, de los cuales China y Estados Unidos ocupan el primer lugar en publicaciones sobre este tema de investigación con 7 documentos. En un segundo lugar, se posicionaron Australia, Canadá e Irán con un total de 2 documentos y no se encuentra registros de países latinoamericanos con investigaciones enfocadas en el uso del aceite residual de cocina como rejuvenecedor en el asfalto contenido en el RAP.

Figura 11. *Documentos por país o territorio*

Fuente. Autoría propia. Base de datos: Scopus

Con el fin de complementar esta investigación con la normativa colombiana, se realizó la búsqueda de documentos gubernamentales pertinentes con el tema.

En el INVÍAS se encontraron las especificaciones generales de construcción; y normas de ensayo para materiales de carreteras, las cuales contienen aspectos relacionados en el estudio de vías, tránsito y transporte; y son de vital importancia para esta investigación. En general, en relación con su contenido, las especificaciones mantienen la estructura general de las precedentes y están constituidas por nueve (09) capítulos. De los cuales, solo se utilizó el capítulo 4 que abarca todo lo que tiene que ver con los pavimentos asfálticos.

Asimismo, el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras se presenta agrupadas por normas en función de sus objetivos, a través de ocho (08) secciones, desde la sección

100 hasta la sección 800. A partir de esto, solo se utilizaron las secciones 700 y 800, que abarcan todo lo que tiene que ver con Materiales, mezclas asfálticas y prospecciones de pavimentos.

En síntesis, en esta etapa se realizó un enfoque de Revisión Sistemática de Literatura (SLR), donde se hizo la respectiva búsqueda de los documentos relevantes para esta investigación, se usaron tres ecuaciones de búsqueda y posterior a los criterios de exclusión, se seleccionaron 22 documentos que hacen parte de la clasificación de artículos, *review* y *conference paper*. Además, se realizó la búsqueda en las normas INVÍAS, en las que se encontraron importantes para esta investigación las secciones 700 y 800 del Manual de Normas de Ensayo de Materiales; y el capítulo 4 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.

6.3 Etapa 3: Rangos y metodología adecuada para la incorporación del aceite residual de cocina (WCO) como rejuvenecedor en el RAP

Los resultados de esta etapa se obtuvieron de la siguiente manera: en primer lugar, se muestran los métodos de incorporación del WCO como rejuvenecedor en el RAP que se han utilizado en los diferentes artículos. Posteriormente, se encontraron los rangos óptimos en los que se debe incorporar el WCO y finalmente, se sugiere la metodología adecuada de incorporación del rejuvenecedor.

6.3.1 Método de Incorporación del WCO como rejuvenecedor en el RAP

De acuerdo a la literatura, existen tres (03) métodos para rejuvenecer el ligante de asfalto envejecido restaurando sus propiedades, los cuales son: (1) mezclar el rejuvenecedor con RAP, (2) pulverización y (3) encapsulación.

El primero es el método mezcla (*mixing method* en inglés), que consiste en mezclar el rejuvenecedor con el asfalto envejecido contenido en el RAP a unas condiciones determinadas que permanecen constantes tales como: tiempo, temperatura y velocidad de mezcla dentro de una planta de asfalto. [2]. Cabe aclarar, que en esta investigación se mencionaran dos tipos de métodos de mezcla, el primero se encuentra en esta etapa, en la cual se determina el porcentaje óptimo de aceite en el asfalto envejecido y el segundo se encuentra en la etapa 5, en la cual se realiza el pavimento utilizando el RAP y el porcentaje óptimo que se presenta en los resultados de la etapa 3.

El método de pulverización (*spraying method* en inglés) consiste en rociar el rejuvenecedor sobre la superficie del pavimento asfáltico. Este método se puede emplear para el mantenimiento preventivo en los primeros 3-4 años de la construcción de un nuevo pavimento para retardar o mitigar la aparición de grietas en la superficie. Asimismo, el rejuvenecedor debe introducirse a una profundidad adecuada en el asfalto para rellenar los espacios vacíos del pavimento [2].

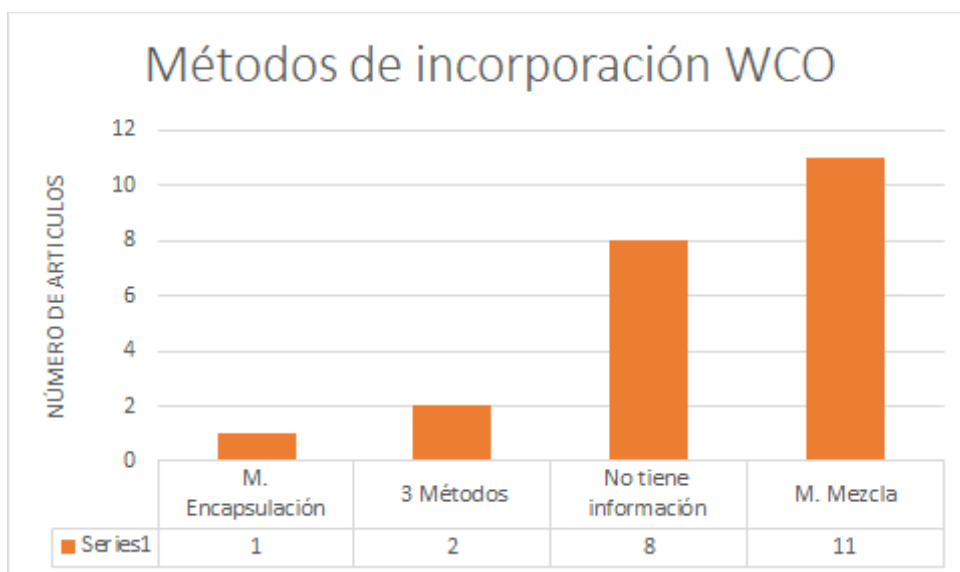
Y, por último, el método de encapsulación (*encapsulation method* en inglés) donde se agregan cápsulas térmicamente estables que deben dispersarse homogéneamente en las mezclas de asfalto en caliente antes de la compactación, para que cuando se rompan liberen el rejuvenecedor y este mecanismo de autocuración pueda cambiar las estructuras químicas de las grietas. Este mecanismo se divide en tres fases: en la primera fase, la cápsula está incrustada en el pavimento y debe soportar las cargas de tráfico, en la segunda fase, las elevadas cargas del tráfico

y el proceso de envejecimiento del asfalto obligarán a la cápsula a agrietarse. Y en la tercera fase, el rejuvenecedor del interior de la cápsula saldrá debido al aumento de la presión en la cápsula. [2], [23].

A continuación, el pavimento asfáltico envejecido se ablandará por la difusión de aceite a través del ligante y la propiedad original del asfalto se restaurará cuando el rejuvenecedor se libere. De tal manera que pueda proporcionar una solución para aumentar la vida útil de los pavimentos asfálticos. [2], [23].

En la figura 12 se presentan los métodos de incorporación del WCO en los 22 artículos encontrados en la búsqueda bibliométrica, de los cuales; 1 artículo presenta el método de encapsulación, 2 artículos presentan los tres métodos (mezcla, pulverización y encapsulación), 8 artículos no presentan información y 11 artículos son del método más utilizado que es el método de mezcla.

Figura 12. Método de incorporación vs. Número de artículos



Fuente. Autoría propia.

Sin embargo, como se muestra en la [tabla 5](#) en 10 de los 11 artículos del método de mezcla se presentan las condiciones necesarias de la mezcla.

Con el fin de tabular la información del método de incorporación del WCO como rejuvenecedor en el asfalto contenido en el RAP a nivel global, se tuvieron en cuenta parámetros como: El tipo de mezclador, la temperatura en grados Celsius (°C), el tiempo en minutos (min) y la velocidad de la mezcla en revoluciones por minuto (rpm); los cuales son los que determinan las condiciones de la mezcla.

A continuación, se presentan los datos obtenidos:

Tabla 5. *Condiciones de mezcla*

Autor	Año	Titulo	Tipo de mezclador	Temperatura (°C)	Tiempo (Min)	Velocidad (rpm)
[9]	2021	Chemical and Performance Characteristics of Rejuvenated Bituminous Materials with High Reclaimed Asphalt Content	Licuada	140	15	1000
[12].	2019	Investigating short-term and long-term binder performance of high RAP mixtures containing waste cooking oil	Mezclador de alto cizallamiento	150	30	5000
[23]	2019	Research on the development and regeneration performance of asphalt rejuvenator based on the mixed waste engine oil and waste cooking oil	Batidor eléctrico	140-150	10	2000
[24]	2019	Effect of Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil on Performance Improvement of Aged Asphalt	Mezclador de hélice	135	15	2000

Autor	Año	Titulo	Tipo de mezclador	Temperatura (°C)	Tiempo (Min)	Velocidad (rpm)
[25]	2018	Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil	N.R.	135	15	3000
[25]	2018	Investigation on Possibility of Waste Vegetable Oil Rejuvenating Aged Asphalt	Agitador	135	15	2000
[26]	2017	Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders	Mezclador de hélice	130	30	200
[5]	2017	Implementing Waste Oils with Reclaimed Asphalt Pavement	Mezclador de laboratorio de cizallamiento	140	5	700
[27]	2017	Application of rejuvenators and virgin bitumen to restore physical and rheological properties of RAP binder	Agitador de betún de techo	160	5	N.R.
[28].	2016	Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil	Mezclador de alto cizallamiento	135	40	5000

Nota: En esta tabla se presentan las condiciones de mezcla encontrada en los documentos de la investigación.

^a N.R: No reportan.

Fuente. Autoría propia

De los resultados expuestos en la tabla 5 según la búsqueda bibliométrica, se concluye que las condiciones del método de mezcla para incorporar el rejuvenecedor en el asfalto contenido en el RAP se encuentran en los siguientes rangos: temperatura (130-160° C), tiempo de mezcla (5-40 min), velocidad de mezcla (200-5000 rpm) y el tipo de mezclador usado depende de cada investigación, los más nombrados son el mezclador de alto cizallamiento y el de hélice.

6.3.2 Rangos del contenido de aceite

La dosis y el tipo de agente rejuvenecedor deben ser adecuados para producir una mezcla rejuvenecida. Algunos autores han confirmado que la dosis de rejuvenecedor debería seleccionarse cuidadosamente considerando las propiedades del ligante virgen y del ligante RAP, ya que su interacción influye en el rendimiento final de la mezcla. [12], [31].

Asimismo, el contenido óptimo de rejuvenecedor se debe calcular para recuperar las cuatro propiedades básicas: penetración, punto de ablandamiento, viscosidad y ductilidad; de manera simultánea para alcanzar el grado de rendimiento (PG) del ligante virgen. [2]

En la [tabla 6](#), se presentan los porcentajes óptimos del WCO para su incorporación como rejuvenecedor en el RAP que se encontraron en 20 de los 22 artículos de la búsqueda bibliométrica.

Tabla 6. Porcentaje óptimo de WCO

Autor	Año	Método de incorporación	Título	% Óptimo	Parámetros analizados
[36]	2021	N.R.	Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture	1%-4%	Penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y viscosidad.
[9]	2021	Mezcla	Chemical and performance characteristics of rejuvenated bituminous materials with high reclaimed asphalt content	5,5% y 11,3%	Temperatura del punto de ablandamiento, viscosidad a 60°C
[4]	2021	N.R.	Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review	1% - 20%	Penetración y punto de ablandamiento
[35]	2020	N.R.	Effect of Bio-Oils on Binder and Mix Properties with High RAP Binder Content	5%	Resistencia al agrietamiento por fatiga, resistencia al agrietamiento a baja temperatura
[7]	2020	N.R.	Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: A state-of-the-art review	1%-4%	Penetración, y punto de ablandamiento

Autor	Año	Método de incorporación	Título	% Óptimo	Parámetros analizados
[31]	2019	Mezcla	Strategies for producing asphalt mixtures with high RAP content	5,5% y 9%	Grado de desempeño a alta temperatura y a baja temperatura (PG) y ductilidad
[3]	2019	N.R.	Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement	3,5%-4%	Penetración y punto de ablandamiento
[2]	2019	Mezcla, Pulverización y Encapsulación	Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review	<10%	Penetración, punto de ablandamiento, viscosidad y ductilidad.
[12]	2019	Mezcla	Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil	9,2% y 2,9%	Grado de desempeño (PG) a alta temperatura (HT) y baja temperatura (LT)
[24]	2019	Mezcla	Research on the development and regeneration performance of asphalt rejuvenator based on the mixed waste engine oil and waste cooking oil	3%-4%	Penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y viscosidad.
[25]	2019	Mezcla	Effect of Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil on performance improvement of aged asphalt	1%-4%	Penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y viscosidad.
[26]	2018	Mezcla	Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil	5%	Viscosidad y vida la fatiga
[27]	2018	Mezcla	Investigation on Possibility of Waste Vegetable Oil Rejuvenating Aged Asphalt	13,4%	Propiedades físicas del asfalto
[32]	2018	N.R.	Comparative laboratory evaluation of waste cooking oil rejuvenated asphalt concrete mixtures for high contents of reclaimed asphalt pavement	13%	ITS (Ensayo de resistencia a la tracción indirecta), Susceptibilidad al daño por humedad, y durabilidad
[8]	2018	N.R.	Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete	10%	ITS, Resistencia a la formación de surcos (rutting), vida de fatiga.

Autor	Año	Método de incorporación	Título	% Óptimo	Parámetros analizados
			containing reclaimed asphalt pavement (RAP)		
[28]	2017	Mezcla	Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders	6%-8%	Penetración, punto de ablandamiento, ductilidad.
[33]	2017	N.R.	Laboratory Comparison of Rejuvenated 50% Reclaimed Asphalt Pavement Hot-Mix Asphalt with Conventional 20% RAP Mix	10,4%	Penetración de 130.
[5]	2017	Mezcla	Implementing Waste Oils with Reclaimed Asphalt Pavement	5,1%	Penetración
[34]	2016	Mezcla, Encapsulación y Pulverización	The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review	5%	Penetración, Fatiga y resistencia a la formación de surcos.
[30]	2016	Mezcla	Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil	4%-6%	Penetración, punto de ablandamiento, ductilidad, viscosidad, rendimiento a baja temperatura del ligante de asfalto.

Nota: Esta tabla presenta los porcentajes óptimos de WCO encontrados en los artículos escogidos en la etapa 2, se presenta además el método de incorporación del aceite que usaron y qué parámetros fueron analizados para obtener ese porcentaje.

^a Los artículos que tienen los 3 métodos de incorporación son tipo *review*.

Fuente. Autoría propia.

En síntesis, el contenido óptimo de rejuvenecedor que incorporó el WCO, se encuentran en un rango de 1% a 20% en peso del asfalto según la mayoría de los estudios.

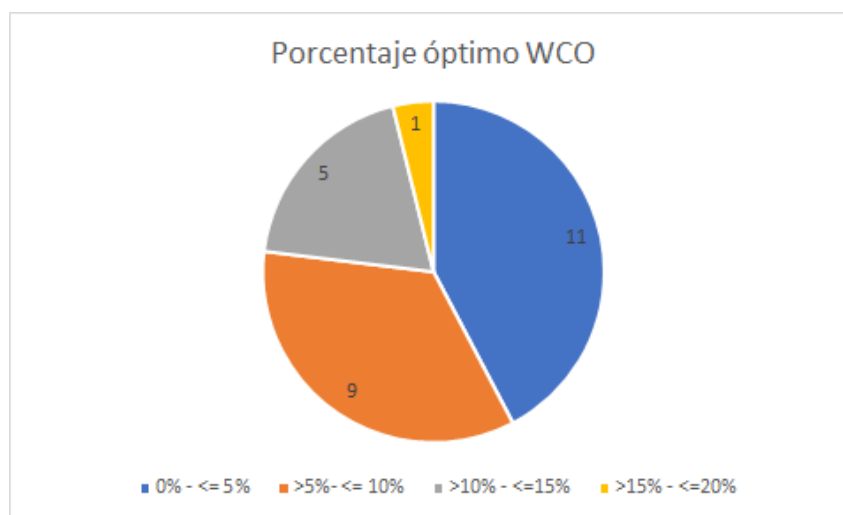
Sin embargo, es importante considerar que el contenido óptimo se escoge con el fin de recuperar los parámetros analizados al nivel del asfalto virgen y dependen de varios factores

determinantes para alcanzar el grado de rendimiento (PG), como el envejecimiento, ya que cuanto más envejecido está el ligante, se requiere mayor dosis de rejuvenecedor para recuperar las propiedades básicas de control. [4]

De igual forma, el clima y las condiciones para seleccionar el contenido óptimo del agente de reciclado son importantes para garantizar el rendimiento a corto plazo del pavimento y el rendimiento deseable a largo plazo. [12]

En un estudio realizado por Majidifard et al. [12] la selección del contenido óptimo de aceite basado en la satisfacción del grado de rendimiento (PG) a baja temperatura (LT por sus siglas en inglés) y alta temperatura (HT por sus siglas en inglés). Los resultados del envejecimiento indicaron que la selección del contenido óptimo de aceite basado en el HT-PG (9,2%) produjo un rendimiento adecuado a largo plazo. Mientras que, la selección del contenido óptimo de aceite basado en los criterios del PG-LT (2,9%) no puede asegurar un rendimiento adecuado del ligante reciclado a largo plazo. Sin embargo, este porcentaje sí es el rendimiento adecuado a corto plazo. [12]

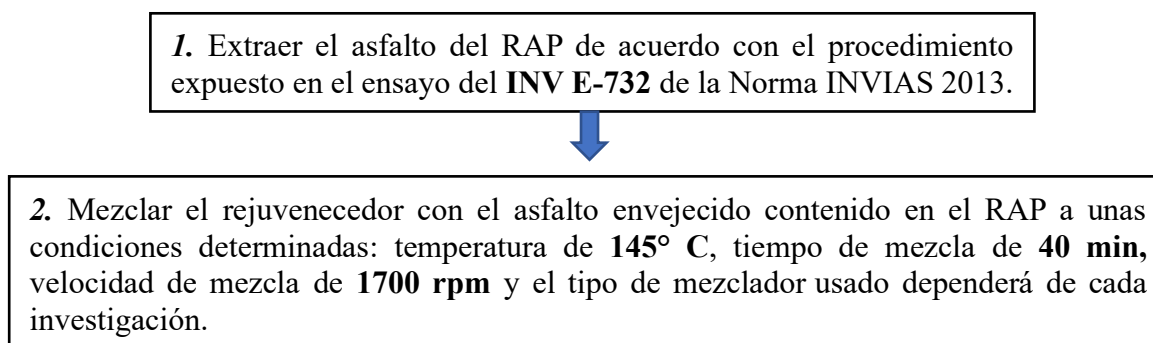
Asimismo, como se muestra en la figura 13, la dosis óptima del WCO más usada por 11 artículos en la búsqueda bibliométrica, suele ser igual o menor al 5% del peso del ligante asfáltico, seguido por 9 artículos que usaron entre 5% y 10%, en tercer lugar, se encuentran 5 artículos entre 10% y 15% y, por último, 1 artículo de 15% a 20%.

Figura 13. Porcentaje óptimo WCO según los artículos

Fuente. Autoría propia

Por tanto, de acuerdo al estudio realizado por Majidifard et al. [12] y al rango más utilizado por los artículos analizados, se propone utilizar un porcentaje de 3% para asegurar el rendimiento adecuado a corto plazo y un porcentaje del 9% para asegurar un rendimiento adecuado a largo plazo. Asimismo, se plantea utilizar también un porcentaje del 6% ya que según los resultados de la susceptibilidad al envejecimiento en el ligante reciclado que fueron expuestos en este mismo estudio condujo a una adecuada resistencia al envejecimiento.

A continuación, se muestra esquemáticamente la metodología sugerida para añadir el WCO en el asfalto contenido en el RAP en la figura 14.

Figura 14. Metodología sugerida para añadir el WCO



3. Mezclar los diferentes porcentajes **3%, 6% y 9%** del rejuvenecedor WCO en peso del asfalto.

Fuente. Autoría propia

6.4 Etapa 4: Identificación del efecto de la composición del aceite residual de cocina sobre las propiedades físicas y químicas del asfalto contenido en el RAP.

Las características físicas del ligante asfáltico se evalúan mediante ensayos convencionales de propiedades físicas, incluyendo el ensayo de penetración (INV E-706), el ensayo de punto de ablandamiento (INV E-712), el ensayo de ductilidad (INV E-702) y el ensayo de viscosidad (INV E-717), con el fin de que se puedan alcanzar valores similares al nivel del asfalto virgen [38].

En el sistema de clasificación de la penetración, el punto de ablandamiento y la ductilidad se correlacionan empíricamente con el rendimiento del ligante asfáltico. Por ende, los ligantes asfálticos con números de penetración y ductilidad altos, y puntos de ablandamiento bajos se utilizan normalmente para climas fríos; mientras que, los ligantes asfálticos con números de penetración y ductilidad bajos, y puntos de ablandamiento altos se utilizan para climas cálidos. [30]

Asimismo, debido a las diferencias en las propiedades físicas y la composición química de los rejuvenecedores, estos pueden tener diferentes efectos sobre las propiedades de los ligantes asfálticos. En la tabla 7, se presenta el resumen de la búsqueda bibliométrica sobre el efecto del WCO en las propiedades físicas que se encontraron en 16 de los 22 artículos.

Tabla 7. *Resumen del efecto del WCO sobre las propiedades físicas y químicas en la búsqueda bibliométrica*

Propiedad	Efecto	Explicación	Referencia
Penetración	Aumenta	La prueba de penetración determina la consistencia y la resistencia a la deformación del asfalto a 25 °C. Entre más altos los valores de penetración, las consistencias son más blandas. Añadir aceite residual de cocina al asfalto proveniente del RAP incrementa la penetración puesto que disminuye la proporción de asfaltenos a maltenos.	[36], [4], [7], [3], [2], [24], [26], [28], [8], [29], [5], [28]
Punto de ablandamiento	Disminuye	El punto de ablandamiento determina la susceptibilidad térmica del asfalto a una temperatura más alta (es decir, comúnmente 30 a 157 °C). A medida que se eleva la temperatura, se torna más blando y menos viscoso. Añadir aceite residual de cocina al asfalto proveniente del RAP disminuye la proporción de asfaltenos de alto peso molecular, lo que da lugar a un asfalto más blando.	[36], [9], [4], [7], [3], [2], [24], [25], [27], [29], [5], [28]
Ductilidad	Aumenta	La flexibilidad y la deformación por tracción del asfalto pueden evaluarse mediante la prueba de ductilidad. Asimismo, la ductilidad mide la propiedad de adhesión del ligante asfáltico. Generalmente, un asfalto de baja ductilidad tendrá un deficiente comportamiento en servicio y presentará pobres propiedades adhesivas. En otras palabras, cuanto mayor sea la ductilidad, mejor será el rendimiento del asfalto. La ductilidad disminuye tras el envejecimiento del asfalto, en general, la adición de una mayor concentración de WCO aumenta la ductilidad, lo que puede mejorar la plasticidad del ligante.	[36], [4], [7], [31], [2], [25], [27], [28], [30]
Viscosidad	Disminuye	Esta propiedad se usa para medir la viscosidad aparente del asfalto a las temperaturas de aplicación (desde 60 hasta más de 200°C). Si el ligante es demasiado viscoso, es más propenso al agrietamiento térmico, mientras que una viscosidad demasiado baja lo hará más vulnerable a la resistencia a los surcos y la fatiga. Añadir WCO al asfalto proveniente del RAP reduce las temperaturas de mezcla y la compactación requerida, lo que mejora la trabajabilidad del asfalto rejuvenecido.	[36], [9], [4], [7], [3], [2], [24], [25], [26], [27], [8], [29], [28], [30]

Nota: Esta tabla presenta las propiedades que se analizan en los artículos, y el efecto que tiene en ellas el uso del WCO como rejuvenecedor. Fuente. Autoría propia.

De los resultados expuestos en la tabla 7, se puede concluir que, en general, al añadir WCO, se tiene una mayor penetración y ductilidad, y una disminución del punto de ablandamiento y la viscosidad.

Ahora bien, dado que el asfalto es una fracción del petróleo crudo, su composición química es una combinación de moléculas que se denominan los cuatro componentes del asfalto o SARA (saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos) y que han demostrado su influencia en las propiedades físicas analizadas anteriormente. Por lo cual, la dosificación de WCO en las fracciones SARA puede reducir los asfáltenos y aumentar los máltenos (saturados, aromáticos, resinas) en el asfalto envejecido, de tal manera que, se rejuvenezca el asfalto envejecido. [4]

Lo anterior, es el efecto deseado del WCO en los cuatro componentes del asfalto, pues a medida que el asfalto envejece, la concentración de máltenos disminuye debido a la oxidación y volatilización, provocando un aumento en la composición de los asfáltenos y, por ende, haciendo que el pavimento asfáltico sea más rígido debido al desequilibrio de asfáltenos y máltenos. [4]

6.5 Etapa 5: Establecimiento de la metodología adecuada para la preparación de un nuevo pavimento incorporando RAP rejuvenecido con aceite residual de cocina.

De acuerdo a la literatura, se usan dos (02) métodos para el diseño de la mezcla de un pavimento incorporando RAP rejuvenecido, los cuales son: (1) método Superpave y (2) método Marshall.

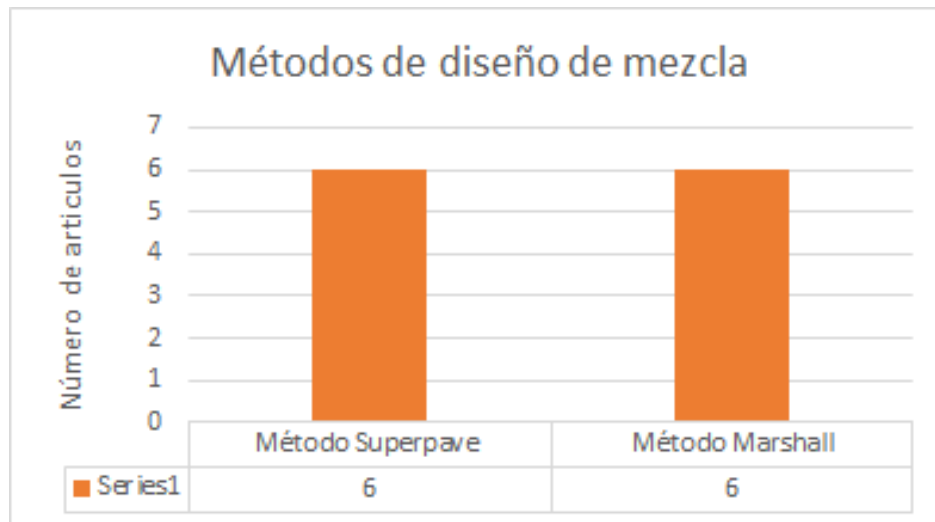
En el primer método, Superpave expresa en inglés *Superior Performing Asphalt Pavements*. El método superpave es descrito en la AASHTO R 35 (*Superpave Volumetric Design For Hot-Mix Asphalt, HMA*). Este método está diseñado para ser utilizado en tres (03) niveles (1, 2 y 3) debido a que a medida que aumenta el nivel, la complejidad y la confiabilidad del diseño

incrementa. Asimismo, el uso de esta metodología depende del nivel de tránsito y de la función de la mezcla en el pavimento. [14].

El nivel 1, fue desarrollado para situaciones donde la mezcla asfáltica conforme pavimentos para bajos volúmenes de tránsito, es el más simple y económico para utilizar. El nivel 2, fue desarrollado para situaciones donde la mezcla asfáltica conforme pavimentos para volúmenes intermedios de tránsito, es 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, sin embargo, es el menos utilizado. [14].

El segundo método es Marshall, este solo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño inferior de 25mm (1’’). Este método se usa para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con gradación densa, y mide la composición volumétrica y la resistencia de la mezcla asfáltica bajo carga monotónica a través de la relación entre la estabilidad y el flujo con el fin de determinar el porcentaje óptimo de asfalto que debe presentar la mezcla para desarrollar en teoría su mejor comportamiento. [14].

En la figura 15 se presentan los métodos usados en el diseño de mezcla en los 22 artículos encontrados en la búsqueda bibliométrica, de los cuales; 6 artículos presentan el método Superpave, 6 artículos presentan el método Marshall, y 10 artículos no realizan pavimentos puesto que se enfocan únicamente en la mezcla asfalto – aceite.

Figura 15. *Métodos usados para el diseño de la mezcla asfáltica*

Fuente. Autoría propia.

De acuerdo con el INVIAS la metodología utilizada para la preparación de un nuevo pavimento es el método Marshall. Teniendo en cuenta que esta investigación se realiza en Colombia, se seleccionó este método y se adaptó para incorporar RAP con aceite residual de cocina como rejuvenecedor como se describe a continuación:

6.5.1 Definición de la mezcla que se va a utilizar

En Colombia estas mezclas son conocidas como MDC (Mezclas Densas en Caliente). Internacionalmente son conocidas como mezclas asfálticas en calientes (HMA por sus siglas en inglés) las cuales presentan agregados pétreos con granulometría bien gradada y con tamaños de partículas sólidas diferentes (gravas, arenas, finos, llenante mineral), mezcladas con cemento asfáltico.

Estas mezclas pueden fabricarse, extenderse y compactarse a alta temperatura (entre 140°C y 180°C aproximadamente). Asimismo, se caracterizan por presentar un bajo contenido de vacíos con aire en volumen (3% a 9%). Son mezclas de alta calidad, las cuales pueden ser utilizadas para conformar cualquier subcapa dentro de la capa asfáltica. Para esta investigación, se estableció la mezcla asfáltica en caliente densa de gradación continua MDC-25 para un nivel de tránsito 2 (NT2).

6.5.2 Caracterización de los agregados para mezclas MDC

El agregado pétreo utilizado para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente debe satisfacer los requisitos de granulometría y calidad del agregado grueso presentado en la [tabla 8](#) que es una adaptación de la tabla 450-6 del INVÍAS 2013, art. 450-13 [37].

Tabla 8. Adaptación de la tabla 450-6 del art. 450-13 No

Tipo de mezcla	Tamiz (mm/ U.S. Estándar)									
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	Nº 4	Nº10	Nº40	Nº80	Nº200
	% pasa									
MD										
Densa		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
C-25										

Nota: Esta tabla muestra los tipos de tamiz que se usan en una MDC y el porcentaje que pasa. Adaptado de INVÍAS, 2013. Art. 450-13 [37].

6.5.3 Preparación de probetas

a) *Número de probetas:* Para determinar el contenido de asfalto para una mezcla mediante el método Marshall, se prepara al menos tres (03) probetas para cada combinación de agregados y contenido de asfalto. Cada muestra de prueba generalmente requiere aproximadamente de 1200g de mezcla.

b) *Preparación de agregados:* Secar los agregados a peso constante en un rango entre 105°C - 110°C y separar los agregados mediante tamizado en seco en las fracciones de tamaño deseado según la tabla 8.

c) *Determinación de la temperatura de mezcla y compactación:* La temperatura de mezcla a la que debe calentarse el asfalto para producir viscosidades de 170 ± 20 cP.

d) *Porcentaje de RAP utilizado:* El porcentaje de RAP utilizado en la mayoría de los estudios revisados en los artículos se encuentra en un rango entre 50% y 100%. Sin embargo, en Colombia el porcentaje máximo es del 40% según lo reglamentando por la INV. E-748-13, por ende, se tomará como porcentaje medio un 20 %.

e) *Porcentaje de asfalto virgen:* El porcentaje de asfalto virgen utilizado en la mayoría de los estudios revisados en los artículos se encuentran en un rango entre 2% a 5%. Por ende, las pruebas deben planificarse sobre la base de incrementos de 0,5% de contenido de asfalto.

6.5.4 Preparación de la mezcla

Las mezclas de diseño Marshall se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar a unas condiciones determinadas.

A continuación, se presenta el procedimiento propuesto para preparar la mezcla asfáltica en caliente de acuerdo con la revisión realizada en los 6 artículos [3], [5], [8], [9], [12], [32] consultados que proponen el método Marshall y la norma INVIAS 2013 [37], [38], [39].

1. Antes de la mezcla, el RAP, el agregado virgen y el asfalto virgen se calientan por separado en un rango entre 135°C a 170°C y un periodo de tiempo entre 1 h y 16 h.
2. Se mezcla el aceite con el RAP calentado anteriormente en un recipiente cubierto con una temperatura entre 94°C y 150°C; y un periodo de tiempo entre 30 s a 15 min.
3. Para la mezcla, el asfalto se calienta a una temperatura para producir una viscosidad de 170 ± 20 cP. Generalmente, estas temperaturas se encuentran en un rango entre 135°C hasta 150°C según la literatura.
4. Se añade primero el RAP rejuvenecido y luego los agregados y el asfalto virgen calentados anteriormente. La mezcla se lleva a cabo con un mezclador mecánico o manualmente con una llana durante un período total entre 30 s y 5 min para obtener una mezcla homogénea y bien recubierta, sin una disminución apreciable de la temperatura entre 94°C y 150°C.
5. Para envasar la mezcla en la probeta se coloca un filtro o un disco de papel no absorbente en el fondo de la probeta.

6.5.5 Compactación de las probetas en el ensayo Marshall

Después tener la mezcla homogénea, se realiza el ensayo Marshall (INV. E 748-13) [38] donde las mezclas se compactan en el molde aplicando 75 golpes con el martillo Marshall o Proctor, en cada cara de la probeta.

Seguidamente se retira el papel filtro del molde de la probeta y se deja que la muestra se enfríe a temperatura ambiente hasta que no se produzca ninguna deformación al sacarla del molde.

6.5.6 Determinación de la gravedad específica bulk

La prueba de gravedad específica bulk se puede realizar tan pronto como las muestras recién compactadas se hayan enfriado a temperatura ambiente. Esta prueba se realiza de acuerdo con INV. E 733-13 [38], "Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos" o INV. E 734-13 [38], "Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas absorbentes empleando especímenes recubiertos con una película de parafina".

6.5.7 Prueba de estabilidad y flujo

Una vez que se ha determinado la gravedad específica bulk de las muestras de prueba, se realizan las pruebas de estabilidad y flujo según el procedimiento que se encuentra en la INV. E 748-13 [38] "Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall":

La estabilidad puede ser entendida como la máxima carga monotónica que es capaz de resistir una probeta de 1200 g de masa y dimensiones de 4" de diámetro y 2,5" de altura a altas temperaturas de servicio (60°C) en el aparato Marshall; mientras que el flujo es el desplazamiento que experimenta en el momento de la falla [14]. Los resultados de estabilidad y flujo dependen en gran medida del grado del asfalto, la cantidad de ligante y la estructura del agregado.

6.5.8 Análisis de densidades y vacíos

Después de completar la prueba de estabilidad y flujo, se realiza un análisis de densidad y vacíos para cada serie de muestras de prueba. Los cálculos para el análisis de vacíos se describen en su totalidad en la norma INV. E-736-13 del INVIAS [38] “Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas”. En la mayoría de los casos, se debe seleccionar el contenido óptimo de asfalto para el cual las muestras compactadas tienen 4% de vacíos de aire.

6.5.9 Criterios para una mezcla de pavimentación satisfactoria

La decisión de si la mezcla de pavimentación asfáltica será satisfactoria con el contenido de asfalto obtenido se rige por la aplicación de ciertos criterios limitantes a los datos de prueba de la mezcla. Los criterios de diseño de mezcla del método Marshall se presentan en la [tabla 9](#), la cual es una adaptación de la tabla expuesta en el numeral 450-10 de la INVIAS 2013, Art. 450-13 [37].

Tabla 9. Adaptación de la tabla 450-10 del art. 450-13

Característica	Norma de ensayo INV	Nivel de tránsito NT2
Estabilidad mínima (N)	E-748	7,500
Flujo (mm)	E-748	2,0 a 4,0
Relación estabilidad/flujo (kN/mm)	E-748	3,0 a 5,0
Vacíos con aire	E-736	Rodadura: 3% a 5%

Nota: Esta tabla muestra los criterios de diseño del método Marshall para un nivel de tránsito 2 y sus respectivas normas de ensayo. Adaptado de INVIAS, 2013. Art. 450-13 [37].

En síntesis, esta metodología es para determinar el porcentaje adecuado de asfalto y preparar mezclas asfálticas en caliente densas de gradación continua MDC- 25 para un nivel de

tránsito 2 (NT2), usando un porcentaje de asfalto del 2% al 5%; un porcentaje de WCO de 3% al 9% y un porcentaje de RAP del 20%.

La mezcla se lleva a cabo con un mezclador mecánico o manualmente con una llana durante un período total entre 30 s y 5 min para obtener una mezcla homogénea y bien recubierta, sin una disminución apreciable de la temperatura entre 94°C y 150°C. Posteriormente, se compactan con 75 golpes por cada lado con el martillo Marshall para que finalmente se ensayen mediante el aparato Marshall para medir la composición volumétrica con el análisis de vacíos y densidades. Así como, la resistencia de la mezcla asfáltica bajo carga monotónica a través de la relación entre la estabilidad y el flujo.

7. Conclusiones

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis teórico sobre disponibilidad del WCO en Bucaramanga, el AMB dispone de 21.000 litros mensuales de WCO que podrían incorporarse como rejuvenecedor en el RAP para la preparación de nuevas mezclas asfálticas reemplazando en un 20% los materiales vírgenes.

- El Área Metropolitana de Bucaramanga actualmente dispone de 21.000 litros mensuales de aceite residual de cocina los cuales son recolectados de los puntos limpios (distribuidos en todo el AMB), restaurantes y conjuntos residenciales que tienen convenio con GRASECOL.

- El método adecuado para incorporar el WCO como rejuvenecedor en el asfalto contenido en el RAP, es el método de mezcla a condiciones de temperatura 145°C, un tiempo de mezcla de 40 min y una velocidad de mezcla de 1700 rpm. El contenido adecuado de rejuvenecedor dependerá del estado del ligante asfáltico, el método de mezcla y los parámetros evaluados, sin

embargo, en esta investigación se sugiere utilizar un contenido de rejuvenecedor con mínimo tres valores: 3%, 6% y 9% en peso del asfalto.

- El efecto que se genera al añadir WCO en la mezcla da como resultado una mayor penetración y ductilidad, mientras que, se disminuye el punto de ablandamiento y la viscosidad. Lo anterior, debido a que, se presenta una alteración en la composición química del asfalto puesto que se reduce la proporción de asfáltenos/máltenos sin que esto signifique que la composición se restablece al estado de asfalto virgen.

- La metodología adecuada para la preparación de un nuevo pavimento incorporando RAP rejuvenecido con WCO consiste en preparar mezclas asfálticas en caliente densas de gradación continua (MDC- 25) para un nivel de tránsito 2 (NT2), usando un porcentaje de asfalto del 2% al 5%; un porcentaje de WCO de 3% al 9% y un porcentaje de RAP del 20%, con un mezclador mecánico o manualmente con una llana durante un período total entre 30 s y 5 min para obtener una mezcla homogénea y bien recubierta, sin una disminución apreciable de la temperatura entre 94°C y 150°C.

Referencias

- [1] H. Asli, and M. R. Karim, “Implementation of waste cooking oil as RAP rejuvenator” in The 9th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies, Kuala Lumpur, MY, 2011.
- [2] A. Behnood, “Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review”, *J Clean Prod*, vol. 231, pp. 171-182, September 2019.
- [3] A. M. El-Shorbagy, S. M. El-Badawy, and A. R. Gabr, “Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement”, *Constr Build Mater*, vol. 220, pp. 228-237, September 2019.
- [4] M. Zahoor, S. Nizamuddin, S. Madapusi, and F. Giustozzi, “Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review”, *J Clean Prod*, vol. 278, January 2021.
- [5] P. Aghazadeh Dokandari, D. Kaya, B. Sengoz, and A. Topal, “Implementing waste oils with reclaimed asphalt pavement” in World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, Barcelona, ES, 2017.
- [6] H. Asli, E. Ahmadiania, M. Zargar, and M.R. Karim, “Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder”, *Constr Build Mater*, vol. 37, pp. 398-405, December 2012.
- [7] R. B. Ahmed, and K. Hossain, “Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: A state-of-the-art review”, *Constr Build Mater*, vol. 230, January 2020.

- [8] H. Taherkhani, and F. Noorian, “Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP)”, *Road Mater Pavement Des*, vol. 21, no. 5, pp. 1238-1257, July 2020.
- [9] G. Guduru, A. K. Goli, S. Matolia, and K. K. Kuna, “Chemical and Performance Characteristics of Rejuvenated Bituminous Materials with High Reclaimed Asphalt Content”, *J Mater Civ Eng*, vol. 33, no. 1, January 2021.
- [10] L. Devulapalli, S. Kothandaraman, and G. Sarang, “Evaluation of rejuvenator’s effectiveness on the reclaimed asphalt pavement incorporated stone matrix asphalt mixtures”, *Constr Build Mater*, vol. 224, pp. 909-919, November 2019.
- [11] L. Durga Prashanth, N. Palankar, and A. U. Ravi Shankar, “A study on the effect of rejuvenators in reclaimed asphalt pavement based stone mastic asphalt mixes”, *Int J Pavement Res Technol*, vol. 12, no. 1, pp. 9-16, January 2019.
- [12] H. Majidifard, N. Tabatabaee, and W. Buttlar, “Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil”, *J Traffic Transp Eng*, vol. 6, no. 4, pp. 396-406, August 2019.
- [13] A. Moniri, H. Ziari, M. R. M. Aliha, and Y. Saghafi, “Laboratory study of the effect of oil-based recycling agents on high RAP asphalt mixtures”, *Int J Pavement Eng*, to be published.
- [14] H. A. Rondón Quintana and F. A. Reyes Lizcano, “*Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*”. Ed. Bogotá: Eco Ediciones, 2015.
- [15] C. Kraemer, J. M. Pardillo, S. Rocci, M. G. Romana, V. Sánchez Blanco and M. A. del Val, “*Ingeniería de carreteras, vol. 2*”. Ed. Madrid: McGraw-Hill, 2004.

- [16] M. V. Laboret. (2014, Sep 21). Reciclado de mezclas asfálticas (Revista vial) [Online]. Available: <https://revistavial.com/recicladados-de-mezclas-asfalticas/>
- [17] S. J. Pardo Rios (2015). Diseño de pavimentos III: Clasificación mezclas asfálticas (Paris Ingenieros S.A.S) [Online]. Available: <http://parisingenieros.blogspot.com/2015/04/disenode-pavimentos-iii-clasificacion.html>
- [18] Sector Aceites y Grasas. (2020, Jun 01). Colombia es el principal productor de palma de aceite de la región (Sectorial) [Online]. Available: <https://www.sectorial.co/informativa-aceites-y-grasas/item/326765-el-aporte-de-la-palma-de-aceite-a-la-econom%C3%ADa-colombiana>
- [19] Fedepalma, “Balance económico del sector palmero colombiano en el primer trimestre de 2019”, Bogotá, Colombia, Boletín 2019-1, Jun 2019.
- [20] Fedepalma, “Balance económico del sector palmero colombiano en 2019”, Bogotá, Colombia, Boletín 2019- 4, Mar 2020.
- [21] P. J. Reyes Torres. (2019, Sep 12). Puntos limpios: el aprovechamiento del aceite de cocina en Bucaramanga (Periódico 15) [Online]. Available:<https://www.periodico15.com/puntos-limpios-el-aprovechamiento-del-aceite-de-cocina-en-bucaramanga/>
- [22] Alcaldía de Bucaramanga. (2019, Ag 17). Conjuntos residenciales y restaurants en la mira de la campaña de recolección de aceite usado (Prensa BGA) [Online]. Available:<https://www.facebook.com/alcaldiadebucaramanga/photos/a.906040432775694/2380741121972277/?type=3>
- [23] W. N. A. W. Azahar, M. Bujang, R. P. Jaya, M. R. Hainin, N. Ngadi, M.E. Abdullah, et al, “A review on application of waste cooking oil as rejuvenator in porous asphalt mixture”, *J Teknol*, vol. 78, no. 4, pp. 105-109, April 2016.

- [24] H. Li, G. Liu, B. Dong, G. Zhao, P. Guo, J. Huang, et al, “Research on the development and regeneration performance of asphalt rejuvenator based on the mixed waste engine oil and waste cooking oil”, *Int J Pavement Res Technol*, vol. 12, no. 3, pp. 336-346, May 2019.
- [25] H. Li, B. Dong, W. Wang, G. Zhao, P. Guo, and Q. Ma, “Effect of waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt”, *Appl Sci*, vol. 9, no. 9, May 2019.
- [26] X. Cao, H. Wang, X. Cao, W. Sun, H. Zhu, and B. Tang, “Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil”, *Constr Build Mater*, vol. 180, pp. 455-463, August 2018.
- [27] C. Xinxin, C. Xuejuan, T. Boming, W. Yuanyuan, and L. Xiaolong, “Investigation on possibility of waste vegetable oil rejuvenating aged asphalt”, *Appl Sci*, vol. 8, no. 5, May 2018.
- [28] J. Ji, H. Yao, Z. Suo, Z. You, H. Li, S. Xu, et al, “Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders”, *J Mater Civ Eng*, vol. 29, no. 3, March 2017.
- [29] E. A. Taziani, E. Toraldo, M. Crispino, and F. Giustozzi, “Application of rejuvenators and virgin bitumen to restore physical and rheological properties of RAP binder”, *Aust J Civ Eng*, vol. 15, no. 2, pp. 73-79, July 2017.
- [30] Z. Sun, J. Yi, Y. Huang, D. Feng, and C. Guo, “Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil”, *Constr Build Mater*, vol. 102, pp. 496-504, January 2016.
- [31] F. Kaseer, A. Bajaj, A. E. Martin, E. Arámbula-Mercado, and E. Hajj, “Strategies for Producing Asphalt Mixtures with High RAP Content”, *J Mater Civ Eng*, vol. 31, no. 11, November 2019.

- [32] A. A. Mamun, and H. I. Al-Abdul Wahhab, “Comparative laboratory evaluation of waste cooking oil rejuvenated asphalt concrete mixtures for high contents of reclaimed asphalt pavement”, *Int J Pavement Eng*, vol. 21, no. 11, pp. 1297-1308, September 2020.
- [33] R. K. Veeraragavan, R. B. Mallick, M. Tao, M. Zaumanis, R. Frank, and R. L. Bradbury, “Laboratory comparison of rejuvenated 50% reclaimed asphalt pavement hot-mix asphalt with conventional 20% RAP mix”, *Transp Res Rec*, vol. 2633, no. 1, pp. 69-79, 2017.
- [34] T. Baghaee Moghaddam, and H. Baaj, “The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review”, *Constr Build Mater*, vol. 114, pp. 805-816, July 2016.
- [35] R. Saha, R. S. Melaku, B. Karki, A. Berg, and D. S. Gedafa, “Effect of Bio-Oils on Binder and Mix Properties with High RAP Binder Content”, *J Mater Civ Eng*, vol. 32, no. 3, March 2020.
- [36] H. Li, F. Zhang, Z. Feng, W. Li, and X. Zou, “Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture”, *Constr Build Mater*, vol. 276, March 2021.
- [37] INVIAS. “Especificaciones generales de construcción de carreteras”, Capítulo 4 – Pavimentos asfálticos, 2013.
- [38] INVIAS. “Normas de ensayo de materiales para carreteras”, Secciones 700 y 800 – Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos (primera parte), 2013.
- [39] INVIAS. “Normas de ensayo de materiales para carreteras”, Secciones 700 y 800 – Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos (segunda parte), 2013.

- [40] Alcaldía de Bucaramanga. Pre – inscripción generadores de aceites de cocina usado – ACU – Resolución 316 de 2018 (AMB) [Online]. Available: <https://www.amb.gov.co/generadores-de-aceites-de-cocina-usado/>
- [41] MINAMBIENTE. “Resolución No. 0316”, Bogotá, Colombia, Mar 2018.