

REVISIÓN DE LITERATURA SOBRE EL USO DE PAVIMENTO ASFALTICO
RECICLADO - RAP EN LAS DIFERENTES CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL
PAVIMENTO.



NICOLAS MEZA URIBE



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
VILLAVICENCIO
2023

REVISIÓN DE LITERATURA SOBRE EL USO DE MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA -
RAP EN LAS DIFERENTES CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.

NICOLAS MEZA URIBE

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

Asesor

I.C. Jessica María Ramírez Cuello, M.Sc.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
VILLAVICENCIO
2023

Autoridades Académicas

Fray José Gabriel MESA ANGULO, O. P.

Rector General

Fray Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

Fray José Antonio BALAGUERA, O. P.

Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo JARCIA JARA, O. P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TABÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Mg. LUIS FERNANDO DIAZ CRUZ

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

A mis padres Édison Meza Granados y Derly Johana Uribe Badillo, por ayudarme a lo largo de mi vida, por estar siempre para mí en los buenos y los malos momentos, si él no estaría en donde estoy sin contar que les debo mi vida.

A mi abuela Beatriz Granados Cabarca, la mujer que siempre estuvo para mí en mi niñez, adolescencia e incluso aún en mi etapa de adultez, la persona que me hizo ser lo que soy, sin dejar de lado a mis tías, Adriana Meza Granados y Marcela Meza Granados y mi abuelo Jorge Álvaro Meza Ojeda, quienes junto a mi abuela y mi madre estuvieron en mi etapa de crianza sin falta, ayudándome siempre a levantarme e incentivándome cada día a ser mejor persona y prontamente un mejor profesional cada día.

Por último y no menos importante a María Camila McCausland, la mujer que se unió más tarde a este listado, pero sin dudas me ha ayudado a estar hoy donde estoy, con la cual he acompañado de cerca tanto en su crecimiento como en el mío y le debo mucho de lo que soy ahora, la que me ha acompañado más de cerca en momentos duros de esta trayectoria y la que me ha animado a seguir y estar cada día más cerca del sueño de ser profesional.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios, por darme la sabiduría, gracia y perseverancia para continuar con este proceso, por permitirme avanzar en las dificultades y poder lograr así mis metas propuestas.

A mi tutora Jessica, por su valioso tiempo, sus asesorías y sus recomendaciones para hacer este trabajo lo mejor posible.

A todos los docentes de la Universidad Santo Tomas sede Villavicencio, por brindarme todos los conocimientos que espero poner en practica pronto y experiencias que de seguro me servirán más adelante.

No puedo dejar de lado a mis amigos, personas que me ayudaron durante el proceso y muy seguramente yo a ellos en su momento, agradecer por todos los lindos momentos que ayudaron a hacer este trayecto mucho más sencillo y feliz y me alegra saber que al final todos lo hemos logrado.

A mis padres, abuelos y tías, mi familia, las personas con las que siempre he contado, las que me enfocaron cuando lo necesite e hicieron de todos los esfuerzos posibles para que yo este dónde estoy hoy en día.

A mi compañera de vida, Maria Camila, por ayudarme en todo momento, no dejarme caer y hacerme una mejor persona y muy seguramente un mejor profesional, así como estoy seguro ella lo será.

Contenido

	Pág.
Resumen	10
Abstract.....	11
1. Introducción.....	12
2. Planteamiento del problema	13
3. Objetivos	14
3.1. General.....	14
3.2. Específicos	14
4. Alcance.....	15
5. Estado del arte	16
6. Metodología.....	19
6.1. Fase 1.	19
6.2. Fase 2.	19
6.3. Fase 3.	20
7. Diferentes formas de implementación del RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado).....	21
8. Implementación En Estados Unidos.....	22
9. Casos De Estudio	25
9.1. Caso 1	25
9.2. Caso 2. Efecto Del Aceite Quemado De Motor Sobre Las Propiedades Físicas Y Mecánicas De Mezclas Asfálticas Que Contienen Rap	27
9.3. Caso 3	29
9.4. Caso 4. Estudio Del Comportamiento De Mezclas Asfálticas Con 100% Rap Y Adición De Cal Hidratada	31
9.5. Caso 5	33
9.6. Caso 6	34
9.7. Caso 7. Mezcla de WMA y RAP.....	35
10. Análisis Económico.....	41
10.1. Caso 1. Alternativa A- “Reciclaje En Frío” In Situ	41
10.1.1. Cálculo De Los Costos “Mantenimiento Convencional”	42
10.1.2. Cálculo De Los Costos “Refuerzo Con Carpeta Mdc-2”	44
10.1.3. Búsqueda De La Mejor Alternativa	47

10.2.	Caso 2.....	48
10.3.	Caso 3.....	49
10.4.	Caso 4.....	50
11.	Aplicaciones	52
11.1.	Agregados En La Base	52
11.2.	Agregados En Bases Estabilizadas	52
11.3.	Material De Relleno.....	52
11.4.	Recuperación De La Profundidad En Su Totalidad.....	53
11.5.	Mezcla Asfáltica	53
11.6.	Algunas Otras Aplicaciones	53
12.	Beneficios De La Implementación Del Rap.....	55
12.1.	Beneficios Ambientales.....	55
12.2.	Beneficios Económicos	55
12.3.	Estimación De La Huella De Carbono	56
12.4.	Recomendaciones De Diseño Al Uso Del Rap	57
13.	Conclusiones	59
14.	Recomendaciones	61
	Referencias bibliográficas	62

Lista de Figuras

Figura 1 Metodología.....	19
Figura 2 Approximate tons of RAP used in recycled asphalt in New Yersey per year...	22
Figura 3 Federal Highway Administration (2019)	23
Figura 4 Efectos de la inclusión del asfalto envejecido en el asfalto virgen	27
Figura 5 Incidencia del WEO en las mezclas de ligantes (envejecido+joven	28
Figura 6 Esfuerzo vs deformación del set 1(máxima deformación).....	30
Figura 7 Ciclos vs Deformacion de las 3 muestras (0%,3% y 6%)	31
Figura 8 Numero de giros vs pérdida de masa.....	32
Figura 9 Árbol de decisiones para la elección del mantenimiento y reparación de vías secundarias.	47
Figura 10 Vía 1, Alternativas de rehabilitación.	50
Figura 11 Vía 2, Alternativas de rehabilitación.	51

Lista de Tablas

Tabla 1 Federal Highway Administration (2019)	23
Tabla 2 Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA A).....	41
Tabla 3 Presupuesto Alternativa A (Reciclaje en frío in situ).....	42
Tabla 4 Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA B)	43
Tabla 5 Presupuesto Alternativa B (Mantenimiento Convencional)	43
Tabla 6 Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA C).....	45
Tabla 7 Presupuesto Alternativa C (Refuerzo con Carpeta MDC-2).....	45
Tabla 8 Criterios de incertidumbre para la toma de decisiones de las alternativas estudiadas.	48
Tabla 9 Costos totales de producción de mezclas asfálticas con 0%, 10% y 20% de RAP	49

Resumen

El Pavimento asfáltico reciclado (RAP, por sus siglas en inglés) es un término empleado a materiales reutilizados de capas asfálticas que luego de ser fresados o demolidos son optimizados con nuevos materiales de asfalto y agregado en la mayoría de las obras realizadas en el país. Este material es empleado en actividades de reconstrucción o rehabilitación del pavimento o en algunas ocasiones en la base granular de su estructura completa. El cual, al ser triturado y tamizado adecuadamente, de acuerdo a una fórmula de trabajo es mezclado con asfalto y agregados se obtiene mezclas asfálticas, pero en otros países se implementa de manera más eficiente, con maquinaria que permita la reutilización “*in situ*”, o con otro tipo de materiales que enriquezcan la mezcla para así conseguir que el pavimento reutilizado iguale las propiedades o componentes de un pavimento virgen. En la actualidad es ampliamente conocido las ventajas del empleo de materiales producto del reciclado de pavimentos en la construcción o rehabilitación de vías; pero la realidad es que la utilización de RAP en proyectos viales en América Latina es bajo; y en nuestro país se encuentra reglamentado por las especificaciones técnicas generales de carreteras (NORMAS INVIAS), pero su empleo en proyectos viales también es bajo. Con la elaboración del documento se aborda el cumplimiento de las especificaciones generales de Carreteras establecidas por el INVIAS por los materiales empleados en la elaboración del RAP y la evaluación de los costos por kilómetro o área con el ánimo de comparar la viabilidad técnica y económica en la rehabilitación de vías. De acuerdo al alto costo económico que genera la rehabilitación de vías y el estado actual de las mismas; se plantea el presente documento investigativo con el ánimo de evaluar los beneficios económicos, ambientales y técnicos de emplear el material RAP en la rehabilitación de vías de la región, ya sea en la carpeta asfáltica como es usado generalmente en el territorio nacional o la implementación de la mezcla en el material granular generando alto impacto ecológico, económico y social con los diversos usuarios de las vías y comunidad en general.

Palabras Clave: Construcción sostenible, estructura del pavimento, normativa, RAP, reciclaje.

Abstract

Recycled asphalt pavement (RAP) is a term used for reused asphalt layer materials that after being milled or demolished are optimized with new asphalt and aggregate materials in most of the works carried out in the country. The RAP is obtained from demolition processes of asphalt layers in service and are used in reconstruction or rehabilitation activities of pavement structures or sometimes in the granular base of the pavement structure. This RAP material, when properly crushed and screened, is mixed with asphalt and aggregates according to a working formula to obtain asphalt mixtures, but in other countries it is implemented in a more efficient way, with machinery that allows "in situ" reuse, or with other types of materials that enrich the mixture so that the reused pavement matches the properties or components of a virgin pavement. At present, the advantages of using recycled pavement materials in the construction or rehabilitation of roads are widely known; but the reality is that the use of RAP in road projects in Latin America is low; and in our country it is regulated by the general technical specifications for roads (NORMAS INVIAS), but its use in road projects is also low. With the preparation of the document, the compliance with the general road specifications established by INVIAS for the materials used in the preparation of the RAP and the evaluation of the costs per kilometer or area are addressed in order to compare the technical and economic feasibility in the rehabilitation of roads. According to the high economic cost generated by the rehabilitation of roads and the current state of the same; this research document is proposed with the aim of evaluating the economic, environmental and technical benefits of using the RAP material in the rehabilitation of roads in the region, either in the asphalt binder as it is generally used in the national territory or the implementation of the mixture in the granular material generating high ecological, economic and social impact with the various users of the roads and the community in general.

Keywords: *Pavement structure, RAP, recycling, regulations, sustainable construction.*

1. Introducción

En América Latina, el principal medio de transporte es por carretera, y para asegurar buenas condiciones de circulación, seguridad y comodidad en la red vial son necesarias altas inversiones en la construcción, mantenimiento y recuperación de estas vías (Jesús, s.f.); los altos costos en los materiales de construcción se deben a que se realizan con mezclas asfálticas en caliente del cual sus agregados pétreos son originados especialmente en la explotación minera. En la actualidad los materiales provenientes de actividades de demolición o fresado de pavimentos asfálticos son poco empleados en contratos de reconstrucción y/o rehabilitación de pavimentos.

Con el tiempo se ha ido consolidando la reutilización de este material, mejor conocido como pavimento asfáltico reciclado – RAP, el cual consiste en recuperar la capa asfáltica del pavimento flexible que ha alcanzado el final de su vida de servicio y reutilizarlo como parte de estructuras nuevas o rehabilitadas, lo cual reduce el nuevo material y por ende la explotación del mismo, generando ahorros a nivel de costos y a su vez contribuyendo a la conservación de los recursos naturales.

Por lo dicho, el propósito primordial de la implementación del RAP como componente de la mezcla asfáltica se direcciona hacia la sostenibilidad ambiental, y en el ámbito económico, la sustitución de un porcentaje de material de mezcla asfáltica representa un ahorro en la cantidad de ligante asfáltico y agregados vírgenes requeridos para la producción de la mezcla.

Esta investigación busca generar una alternativa para la rehabilitación de vías del territorio nacional de una manera económica y amigable con el medio ambiente basada en la aplicación de resultados y experiencias realizadas en diversas investigaciones tanto nacionales como internacionales, también se aborda el grado de cumplimiento de pavimentos reciclados de acuerdo al marco normativo actual (INVIAS) y un análisis de costos que demuestre la viabilidad de la implementación del RAP en la infraestructura vial nacional.

2. Planteamiento del problema

En la actualidad los materiales provenientes de la actividad de demolición y fresado de pavimentos asfálticos, son poco reutilizados. Esto se evidencia en el bajo porcentaje de RAP permitido en la norma técnica del INVIAS 461-07 y 462-07 correspondientemente a la adición máxima permitida es de 40% en la construcción de una vía. Es importante indicar que el estado de las vías en nuestro país no es el más adecuado en niveles de confort y seguridad, lo anterior debido al incremento exponencial del parque automotor y a la baja asignación de recursos para mantenimientos de la red vial. El costo elevado en las actividades de restauración de vía se debe a que las intervenciones para las rehabilitaciones y mantenimiento, se realiza con mezclas asfálticas en caliente tradicionales las cuales están compuestas principalmente por agregados pétreos producto de explotación minera y asfalto líquido procedente de la destilación del petróleo. Como anteriormente se mencionó, la normativa nos indica una adición máxima de RAP del 40% (INVIAS), lo cual a su vez nos limita en el proceso de ayudar a cerrar el ciclo de la construcción de los pavimentos, en el cual se busca dejar la explotación de materia prima, para ello lo ideal sería aproximar lo más cercano posible y viable el porcentaje de uso de RAP al 100%. En Colombia no se hacen los estudios necesarios para ayudar a aumentar ese porcentaje en la estructura del pavimento, pero en países como Estados Unidos, la mayoría de sus estados cuentan con porcentajes entre el 40% o el 65% (Federal Highway Administration, 2011), lo cual nos indica que es posible usar más porcentaje de RAP en las mezclas de la estructura de los pavimentos gracias a los aditivos o los rejuvenecedores.

¿Existe la posibilidad de emplear pavimentos asfálticos reciclados en la rehabilitación de vías en el territorio nacional, su costo sería viable en comparación a un pavimento asfáltico tradicional?

3. Objetivos

3.1. General

Analizar el uso de RAP en las diferentes capas de la estructura del pavimento urbano y rural, a través de revisión bibliográfica e investigación cualitativa y cuantitativa tanto en el territorio nacional, como internacional.

3.2. Específicos

- Identificar propiedades físico – mecánicas del material proveniente de fresado y demoliciones de pavimentos asfálticos en servicio.
- Establecer desde el punto de vista normativo y económico los beneficios de emplear el RAP en la rehabilitación de vías urbanas.
- Evaluar, de acuerdo a la investigación realizada la viabilidad técnica, económica y ambiental sobre el uso del RAP en el territorio nacional.

4. Alcance

Por medio de una revisión bibliográfica se busca analizar el uso del RAP en las diferentes capas de la estructura del pavimento, investigando así las propiedades físico - mecánicas del material que proviene del fresado y así poder evaluar, teniendo en cuenta la normativa nacional, la viabilidad técnica, económica y ambiental que tiene el uso del RAP en las vías del País.

5. Estado del arte

Después de la segunda guerra mundial, el uso de técnicas de reciclado fue de los primeros precedentes al momento de reparar algunas carreteras secundarias afectadas, técnicas las cuales luego fueron replicadas en el Reino Unido, llamando a este procedimiento como "Retread Process" o el proceso de recauchutado (Dabić-Ostojić, S., Miljuš, M., Bojović, N., Glišović, N., & Milenković, M. (2014)).

Se le atribuye a los Estados Unidos ser de los primeros en emplear los pavimentos asfálticos reciclados a mediados de los años 70, pues, ellos reconocieron que esta técnica les brindaría ventajas tanto económicas como ambientales. Luego de eso, países como Canadá, Alemania, Holanda, Brasil, España, entre otros, replicaron esta técnica para así crear grandes producciones en el reciclado de pavimentos (Miranda-Argüello, F., & Aguiar-Moya, J. P. (2019)).

El RAP es un material que ha experimentado un proceso de envejecimiento y endurecimiento progresivo durante la vida de servicio debido a diversos mecanismos los cuales definen las características del ligante, nos dice Roberts, Kandhal, Brown & Kennedy (1996), Tyrion (2000) y Karlsson & Isacsson (2006), estos mecanismos corresponden a la oxidación por reacción de difusión ubicados entre la carpeta y el oxígeno en el aire, volatilización debido a la evaporación de los componentes más ligeros, más comúnmente en la construcción, la polimerización por reacción química de componentes moleculares, tixotropía debido a la formación de una estructura dentro de la carpeta de asfalto durante un periodo de tiempo extenso, sinéresis, esto debido a la exudación de finos componentes aceitosos, realizar una separación a través de la eliminación de componentes grasos, resinas y asfáltenos por agregados que son absorbentes. La combinación entre el ligante virgen con el ligante envejecido puede llevar a la formación de conglomerados entre el agregado y el relleno (también llamado filler) esto afecta los procesos de mezclado debido a que dificulta la penetración del asfalto virgen en el momento de ser incorporado (Oliver, 2001). Siguiendo por la misma línea, debido a investigaciones previas, se sabe de la existencia de un efecto del precalentamiento del RAP previo al mezclado, lo cual resulta ser clave en el tiempo de mezclado entre asfaltos tanto vírgenes como envejecidos y el grado de desempeño que pueda tener el ligante combinado (Stephens, Mahoney & Dippold, 2001).

El RAP, al ser un material recuperado del pavimento, puede llegar a contener material del pavimento original, ya sea sobrecapas, baches, sellos u otros tratamientos de mantenimiento

(McDaniel & Anderson, 2001), lo que lo convierte en un material altamente variable en cuanto a composición. De igual modo, las propiedades del material dependen directamente del nivel de daño que ha experimentado el pavimento durante su vida útil (Smiljanic, Stefanovic, Neumann, Rahimaian & Jovanovic, 1993), por lo cual la dispersión en el comportamiento esperado de la mezcla final se ve aumentado. El manejo de los apilamientos no es más que otra fuente de variabilidad. Para conseguir la correcta implementación de material de RAP dentro de la mezcla asfáltica se necesita de un correcto desarrollo de técnicas adecuadas para el almacenamiento y procesamiento del RAP, para así obtener el material más homogéneo que sea posible. Se debe considerar que los largos periodos de almacenamiento de material de RAP, producen un proceso de oxidación aún más rápido debido a la exposición directa del aire (McMillan & Palsat, 1985), esto, solo deja ver la necesidad de controlar el almacenamiento del material recuperado para así aprovecharlo al máximo posible.

Actualmente, materiales que provienen de actividades de demolición o fresado de pavimentos asfálticos son poco empleados en contratos de reconstrucción y/o rehabilitación de pavimentos. Esta situación la origina a que no existen políticas públicas acerca de la reutilización de materiales pétreos de manera parcial o total en diferentes procesos de actividades de obra; en países donde la extracción de material de agregados es escasa esta es una solución muy sostenible desde el punto de vista ambiental y económico.

El reciclado de pavimentos flexibles, es una técnica viable y económica si se busca el mejoramiento y mantenimiento de las carreteras colombianas, debido a que hace posible reutilizar los materiales encontrados en nuestras carreteras, luego de cumplir con su vida útil, lo que representa economía en el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos en servicio, conservando así el patrimonio vial. (INVIAS O. d., 2012)

A mediados del año 2007, a través de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, el Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS), llevo a cabo ciertas actualizaciones que reglamentaron el Reciclado de Pavimento asfáltico en frío en el lugar o InSitu y el Reciclado de Pavimento asfáltico en Planta y Caliente a través de los Artículos 461 y 462, respectivamente (INVIAS, 2007), actualmente estas normas INVIAS han sido objeto de actualización y los artículos que reglamenta los pavimentos asfálticos reciclados se encuentran en el Capítulo 4 y Artículo 461-13 y el Artículo 462-13. Por su parte, el Instituto de Desarrollo Urbano

de la ciudad de Bogotá (IDU), reglamentó en el año 2011 el reciclaje de pavimento asfáltico In-Situ y su estabilización con aditivos bituminosos y/o hidráulicos (IDU, 2011). (Benítez, 2013).

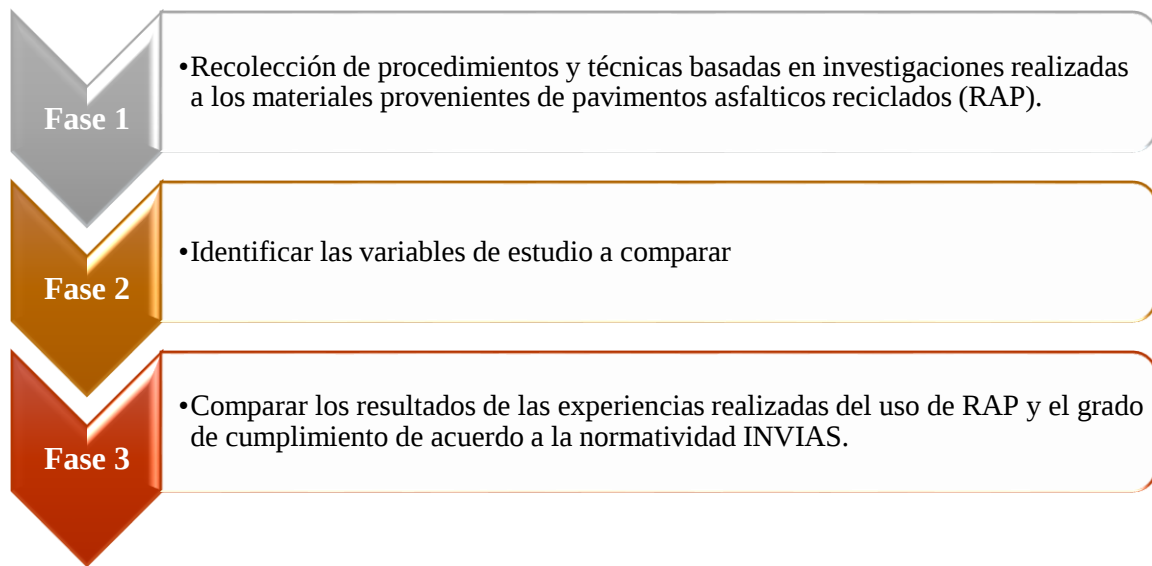
En Colombia se ha implantado el sistema de reciclaje de pavimentos en frío para diversos proyectos, se pueden nombrar algunas experiencias al respecto como: la vía Puertos López – Puerto Gaitán (Meta), Quibdó – Yuto (Choco), Medellín – Santuario (Antioquia), Cali - Loboguerrero (Valle del Cauca), Manizales - Mesones (Caldas), Autopista Bogotá – Villavicencio (Cundinamarca), entre otras. En la ciudad de Bogotá se ha llevado a cabo algunos trabajos de reciclaje en frío en vías principales, como: Av. Américas, Av. 68, Av. Boyacá, Av. Lara Bonilla. Calle 127 y en algunas vías de las localidades de: Engativá, Los Mártires, Kennedy, Usme, Bosa, entre otras. (CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA, 2007) En el departamento de Antioquia también se ha llevado a cabo en la vía al mar destacándose los tramos: Uramita – Dabeiba – Mutatá – Chigorodó y El Tres – Turbo. (Restrepo H., Stephens S., 2015).

Algunos de los aceites plastificantes más comercializados en el territorio nacional en cuanto al reciclado en caliente, cumplen con las especificaciones ASTM para rejuvenecedores, de los cuales se espera que cumplan con la expectativa que se considera básica como lo es el restituir el ligante resultante, buscan garantizar en el producto, gracias a la composición química y las características reológicas, su capacidad ligante y la resistencia al envejecimiento. Los aceites que cumple con las especificaciones ASMT son los que afectan de manera más positiva el comportamiento de la mezcla, dos ejemplos de estos aceites son el aceite Nafténico Shell Talpa 20 y el aceite aromático de Icobandas (Méndez Revollo, A. A. (2015)).

6. Metodología

La presente investigación está desarrollada de manera cualitativa y cuantitativa. Para dar cumplimiento a los objetivos, se plantearán las siguientes fases:

Figura 1 Metodología



6.1. Fase 1.

Recolección de procedimientos y técnicas basadas en investigaciones realizadas a los materiales provenientes de pavimentos asfálticos reciclados (RAP); la investigación describe las experiencias de investigadores y comunidad académica entorno a los pavimentos asfálticos reciclados a nivel mundial, nacional y regional.

- Recopilar toda la información necesaria.

6.2. Fase 2.

Identificar las variables de estudio a comparar

- Determinar a través de investigaciones realizadas en el ámbito nacional a los materiales provenientes de demolición de pavimentos asfálticos y experiencias recopiladas de autores de documentos técnicos en el uso de pavimentos reciclados.
- Obtener información de las ventajas y limitaciones que tienen las capas de la estructura del pavimento implementando la metodología RAP sobre el pavimento convencional.

6.3. Fase 3.

Comparar los resultados de las experiencias realizadas del uso de RAP y el grado de cumplimiento de acuerdo a la normatividad INVIAS, para ser empleado en la carpeta de rodadura de un pavimento. Finalmente se realiza los análisis del comportamiento del RAP desde el punto de vista normativo y económico para el empleo en vías urbanas de la región.

- Realizar una comparación entre los pavimentos con metodología RAP y el pavimento convencional.
- Identificar las ventajas y desventajas de los pavimentos con metodología RAP
- Conclusiones.

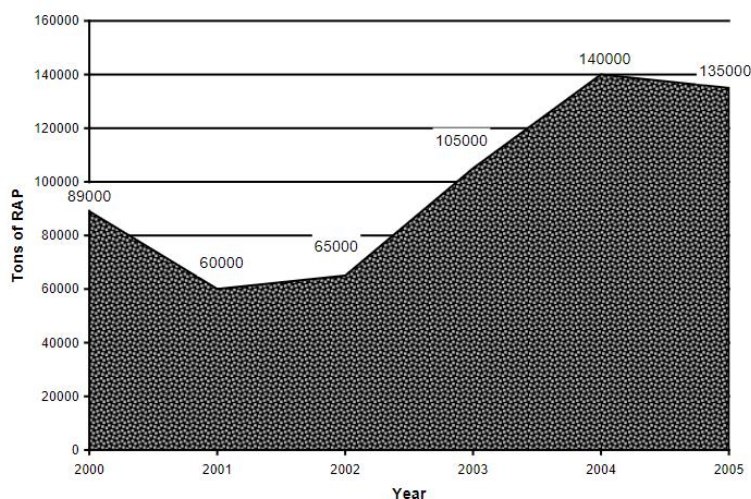
7. Diferentes formas de implementación del RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado)

Colombia tiene 142.284 km a la red vial terciaria, donde solo el 6% está en buen estado (Senado, 2019), es así como resultado del mantenimiento de las vías se está generando un producto conocido como el RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), que viene siendo acopiado en patios por las entidades contratantes que ejecutan obras viales y el cual se está aprovechando en proporciones muy bajas. No obstante, el RAP, es un material con buenas características físico-mecánicas al cual se le puede dar un segundo uso y evitar su pérdida por cuanto en estos momentos la normatividad únicamente permite su utilización máxima en un 30% en mezclas asfálticas, sin embargo, si se llegará a utilizar este material en un 100% impactaría de manera positiva el ambiente porque conlleva a la reducción de la explotación de los recursos naturales.

8. Implementación En Estados Unidos

Los datos suministrados por la Asociación Nacional de Pavimento de Asfalto (NAPA, por sus siglas en inglés) nos dicen que el material de pavimento asfáltico virgen en USA es de aproximadamente 500 millones de toneladas al año, lo cual indica unos 60 millones de toneladas de material recuperado que se reutiliza o recicla directamente en pavimentos. partir de 2007, unos 40 millones de toneladas de RAP se reutilizan o reciclan en otras aplicaciones relacionadas con el pavimento cada año para un uso total de más de 100 millones de toneladas de RAP cada año (Federal Highway Administration,2011). Esto supone un aumento con respecto a los 72 millones de toneladas de RAP utilizadas cada año a principios de la década de 1990. Dado que la mayor parte del asfalto recuperado se reutiliza o se recicla, el asfalto tiene la tasa de reciclaje más alta por porcentaje entre los materiales reciclados. Uno de los principales problemas que plantea el seguimiento de la cantidad de RAP utilizado es que la HMA no se licita en función de sus componentes o de si contiene o no RAP, sino que se licita como material en sí mismo. El Departamento de Transporte de Nueva Jersey realizó un seguimiento de las cantidades aproximadas de RAP utilizadas. Encontró un aumento significativo en la cantidad de RAP utilizado entre 2003 y 2005, en comparación con 2002. Del mismo modo, otros encuestados observaron un aumento en el uso de RAP (8 de 18, es decir, alrededor del 45%), y algunos señalaron que los contratistas solicitaron la aprobación de mezclas con mayores porcentajes de RAP (es decir, más del 25% de RAP) (Federal Highway Administration (2019))

Figura 2 Approximate tons of RAP used in recycled asphalt in New Yersey per year.



En Estados unidos la incursión del RAP es más que evidente, pues en la mayoría de los Estados está permitido la implementación del RAP en más del 25%, como lo muestra la siguiente imagen:

Figura 3 Federal Highway Administration (2019)

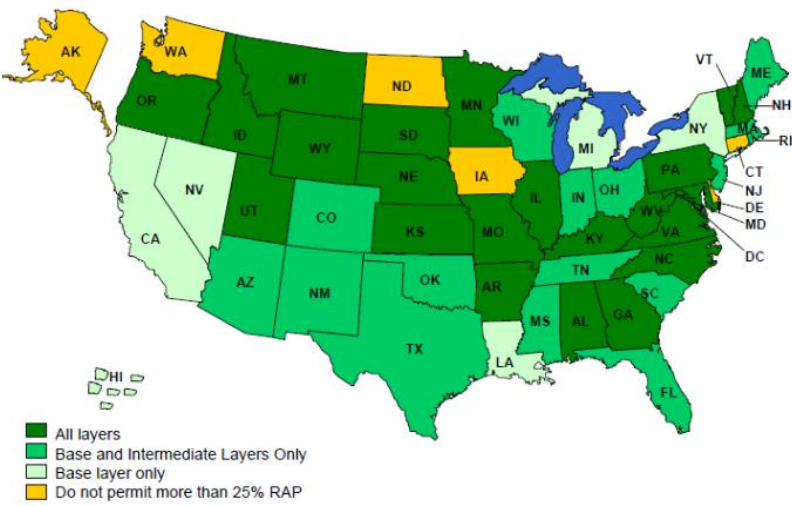


Tabla 1 Federal Highway Administration (2019)

LUGAR	% RAP	FECHA DE CONSTRUCCIÓN
NORTH CAROLINA	40%	sep-07
SOUTH CAROLINA	30% y 50%	oct-07
WISCONSIN	25%	nov-07
FLORIDA	45%	dic-07
KANSAS	30% a 40%	may-08
DELAWARE	35%	Verano 2008
MINNESOTA (MNROAD)	30%	jun-05
ILLINOIS	10% a 50% permitido	jun-05

En la siguiente tabla se evidencia algunas carreteras ubicadas en estados de USA, con su respectivo % de RAP permitido en cada estado y con la fecha de finalización de las obras, lo cual nos evidencia que a nivel internacional el porcentaje de RAP en la estructura del pavimento es superior al utilizado en el territorio nacional.

9. Casos De Estudio

Como parte esencial del estudio del RAP, el análisis de la adhesión, la cohesión, la fatiga y el ahuellamiento del material son necesarias para estudiar su desempeño bajo cargas vehiculares, ya que estos materiales han pasado por un proceso que ha alterado sus propiedades originales y, por lo tanto, requieren estudios adicionales para su utilización.(Figueroa, Velásquez, Reyes, y Bahía, 2013; Herrera, Velásquez, Infante, Gómez, y Lizcano, 2013; Qin, Schabron, Boysen, y Farrar, 2014)

9.1. Caso 1

El estudio se divide en cuatro secciones, en donde la primera es el manejo del material recuperado el cual es un inciso importante debido a que si se implementa de manera correcta el almacenamiento y procesamiento del RAP, ayuda a controlar sus propias necesidades. Algunas de las técnicas incluyen la eliminación de la contaminación, separar de diferentes fuentes los apilamientos del RAP, el procesamiento del RAP, almacenamiento del RAP procesado y la caracterización del RAP inmediatamente después de ser procesado (F., Zhou, G., Das, T., Scullion y S., Hu, (2010)). Le sigue la caracterización del RAP en el cual recomiendan los siguientes métodos de ensayo:

- El método de extracción del disolvente (AASHTO T 164) para determinar el contenido de asfalto en las muestras que contienen RAP.
- Se analiza el ligante asfáltico recuperado por el método AASTHO M 320
- De acuerdo con AASTHO T 30 se determina la granulometría del agregado extraído de las muestras de RAP
- Mediante el AASTHO T 84 se determina la gravedad específica y T85 en caso de ser porciones finas o gruesas.

Luego el diseño de la mezcla asfáltica, la cual se rige bajo la metodología Superpave de diseño de mezcla. El diseño de las mezclas de materiales vírgenes es similar para el caso de mezclas con RAP para la mayoría de los casos (Leiva-Villacorta, F., & Vargas-Nordcbeck, A. (2017)).

Por último, la producción y control de la calidad de las mezclas que contengan RAP, en donde se destaca la selección de desempeño del Ligante Virgen, los ensayos para evaluar el desempeño del ligante asfáltico, pues el ligante varía normalmente entre 3 y 7% en su peso. Este ligante debido al envejecimiento que es causado a la exposición del pavimento al oxígeno atmosférico (conocido como oxidación) se vuelve más rígido durante el uso y la intemperie (Chesner, WH, RJ Collins y MH MacKay, (1998)). Es necesario también un ensayo de agrietamiento por fatiga para poder caracterizar el comportamiento que tiene la fatiga del ligante utilizando el Reómetro Dinámico de Cortante. Las recomendaciones del ensayo se realizan a temperatura intermedia del grado PG de acuerdo a las recomendaciones establecidas en el NCHRP 459 (Bahia, HU, Hanson, DI, Zeng, M., Zhai, H., Khatri, MA, Anderson, RM, (2001)).

En el estudio se realizaron pruebas adicionales para evaluar las propiedades del ligante asfáltico, las cuales fueron: Análisis Termo gravimétrico, Análisis de Calorimetría de Barrido Diferencial, Análisis Infrarrojo con Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier, Análisis de contaminantes en el RAP (Shen, S. y S. Carpenter (2005). **Y también un par de ensayos** el dónde el primero fue un ensayo para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad y otro ensayo de deformación permanente (Mohammad, L., Wu, Z., Obulareddy, S., Cooper, S. y Abadie, C. (2006)).

Este estudio presenta algunas técnicas las cuales son las adecuadas para la obtención, almacenamiento y el procesamiento para obtener mezclas de RAP de una buena calidad. Para reducir la selección de la granulometría y el contenido de asfalto es importante un correcto procesamiento. Para identificar las necesidades de las propiedades del material RAP se debe tomar muestras del apilamiento de RAP de forma aleatoria. El tamaño máximo de los agregados en el proceso de producción se recomienda que sea un máximo de 38mm. La manera como se efectúe el proceso de RAP puede llegar a afectar el tamaño de las partículas y así dar lugar a posibles excesos de partículas que pueden ser de gran tamaño, los cuales deberán ser tamizados o en su defecto eliminados. El grado del desempeño PG se debe ajustar para que se tenga en cuenta la contribución del material que se tenga de asfalto reciclado, dejando así los siguientes parámetros:

- Si se tiene menos de 1 5% RAP no es necesario ajustar el grado PG del ligante virgen.
- Si se tiene RAP entre 15 % y 25 %, se recomienda reducir en un grado el PG del ligante virgen.

- Si se tiene RAP mayores 25 % el grado apropiado del asfalto virgen debe ser obtenido mediante los gráficos de mezcla (Leiva-Villacorta, F., & Vargas-Nordbeck, A. (2017).

9.2. Caso 2. Efecto Del Aceite Quemado De Motor Sobre Las Propiedades Físicas Y Mecánicas De Mezclas Asfálticas Que Contienen Rap

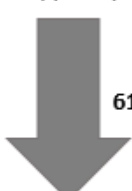
El pavimento asfáltico recuperado de la vía El Guamo - Saldaña, km 6. El contenido de asfalto envejecido en el RAP es del 6,4 % y los agregados extraídos corresponden al 61 % de arena, 30 % de grava y 9 % de finos, clasificando como SW-SM, arena bien gradada - arena limosa, de acuerdo con el USCS, o como A-1-a, según la AASHTO.

Para el caso de este estudio, De manera general, la composición de las mezclas corresponde a 65 % de agregados vírgenes y 35 % de RAP (porcentajes y proporciones en peso). La cantidad de asfalto nuevo fue ajustada, considerando el porcentaje de asfalto envejecido presente en el RAP (6,5 %) y las adiciones de WEO (0 %, 5 %, 10 % y 15 %), hasta alcanzar el óptimo teórico de asfalto en la mezcla del 5,9 %, el cual se determinó mediante el método Duriez. Es de aclarar que en este estudio el WEO fue considerado como ligante.

Temperatura: Las temperaturas de los materiales en el proceso de mezclado para cada una de las inclusiones de WEO fueron las siguientes: para los agregados vírgenes y el RAP, 165 °C, 162 °C, 160 °C y 135 °C, para el asfalto nuevo, 160 °C, 157 °C, 155 °C y 130 °C, y el WEO fue adicionado sin calentamiento previo (temperatura de calentamiento segura 163±1 °C).

9.2.1. Resultados

Figura 4 Efectos de la inclusión del asfalto envejecido en el asfalto virgen

INCIDENCIA DE ASFALTO ENVEJECIDO EN LIGANTE NUEVO		
PARÁMETRO		
Viscosidad	Penetración	Ablandamiento
2.977,9P	63 (1/10mm)	72,1 C
		
49%	61%	51%
2.000P	24,8 (1/10mm)	47,7 C

Se puede evidenciar aumento de la viscosidad (de 2000 P => a 2977 P), incremento de la temperatura del punto de ablandamiento (de 47,7 o C => a 72,1 o C) y disminución de la penetración (de 63(1/10 mm) => a 24,8(1/10 mm)).

La incorporación del asfalto envejecido al asfalto original dio lugar a un aumento en la viscosidad y en la temperatura del punto de ablandamiento, con una disminución de la penetración.

9.2.2. Comparativa Con La Mezcla Weo

Figura 5 Incidencia del WEO en las mezclas de ligantes (envejecido+joven)

INCIDENCIA DEL WEO EN MEZCLA DE LIGANTES			
Parámetro	Inclusión de WEO		
	5%	10%	15%
Viscosidad	2.977,9P	1.757,0P	798,9P
	↓ 41%	↓ 55%	↓ 52%
Ablandamiento (°C)	72,1	52,6	45,1
	↓ 27%	↓ 14%	↓ 12%
Penetración (1/10mm)	41,0	87,9	147,8
	↑ 66%	↑ 114%	↑ 68%
	24,8	41,0	87,9

Con el incremento del WEO se generan los efectos contrarios: se obtiene un ligante menos viscoso y de menor consistencia. Lo anterior demuestra que con la inclusión de WEO se pueden conseguir unas propiedades cercanas a las de un asfalto original, sin envejecer. En cuanto a las propiedades de las mezclas [estabilidad y flujo, susceptibilidad al agua y módulo resiliente), se

evidencia que al incluir WEO se disminuye la rigidez de la mezcla, que es finalmente uno de los inconvenientes medidos en las características mecánicas que presentan las mezclas asfálticas con RAP.

9.2.3. Consideraciones

Este estudio se realizó en el departamento de Tolima, lo cual toma en cuenta el factor geográfico para la realización de las conclusiones, pues, en el departamento del Tolima, genera considerables cantidades de WEO, por lo tanto, en cuanto a costos de transporte, para el caso de este estudio disminuiría, puesto que está ubicado en la zona.

El WEO se podría usar como agente rejuvenecedor para mezclas asfálticas con RAP (también reciclado), la combinación WEO + RAP se convierte en una alternativa que contribuye a la solución del problema de mantenimiento y/o construcción de buena parte de malla vial. Con esto, se quiere aportar una alternativa para el uso efectivo del RAP en Colombia, obteniendo un material apto para ser reutilizado en capas intermedia en la realización de proyectos de mantenimiento y conservación de vías secundarias y terciarias a menor costo, contribuyendo además a la conservación de los recursos naturales y a la disminución del impacto ambiental.

9.3. Caso 3

En el caso de este estudio se cuenta con dos tipos de mezclas mezclas distintas (100% RAP y RAP+GCR), en donde una de las variables que tuvo mayor influencia durante la consecución del RAP fue el contenido de ligante presente en la mezcla envejecida. Este parámetro es esencial para garantizar la homogeneidad del RAP seleccionado.

Se evaluarán dos principales parámetros, la fatiga y el ahuellamiento.

9.3.1. Comparativa de fatiga

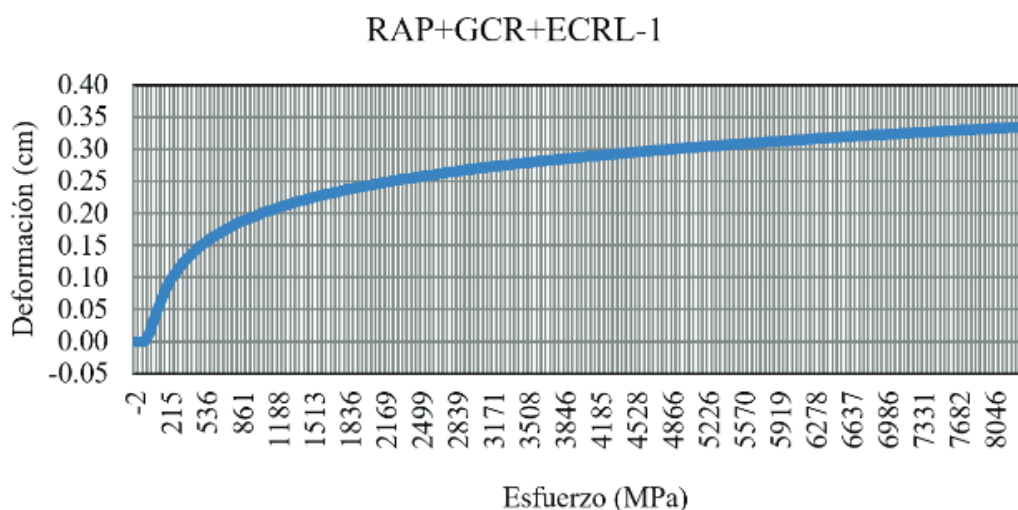
La comparación de la ley de fatiga de las dos mezclas, 100% RAP y RAP+GCR, evidencia la diferencia de pendientes entre las dos, de tal manera que, para un millón de ciclos, la mezcla 100% RAP presenta mayor deformación respecto a la modificada con emulsión CRL-1 y GCR.

El ensayo de fatiga para la mezcla de RAP completamente virgen y sin ligante no se consiguió, dado que por los procesos de envejecimiento la adhesión se pierde completamente. Debido a esto, se realizó un ajuste con emulsión CRL-1+GCR. Comparando la ley de fatiga para la mezcla con 100% RAP y la mezcla RAP+GCR, se evidencia que los resultados de la adición de emulsión CRL-1 y GCR, mejoran considerablemente los resultados de deformación de las mezclas con pavimento reciclado.

9.3.2. Ahuellamiento

La deformación plástica máxima se presentó primer set (seis briquetas) según la INV E 756-13, arrojó resultados de 0,34 cm de deformación máxima, sin embargo, este dato debe ser contrastado con más muestras y diferentes contenidos de asfalto residual

Figura 6 Esfuerzo vs deformación del set 1(máxima deformación)



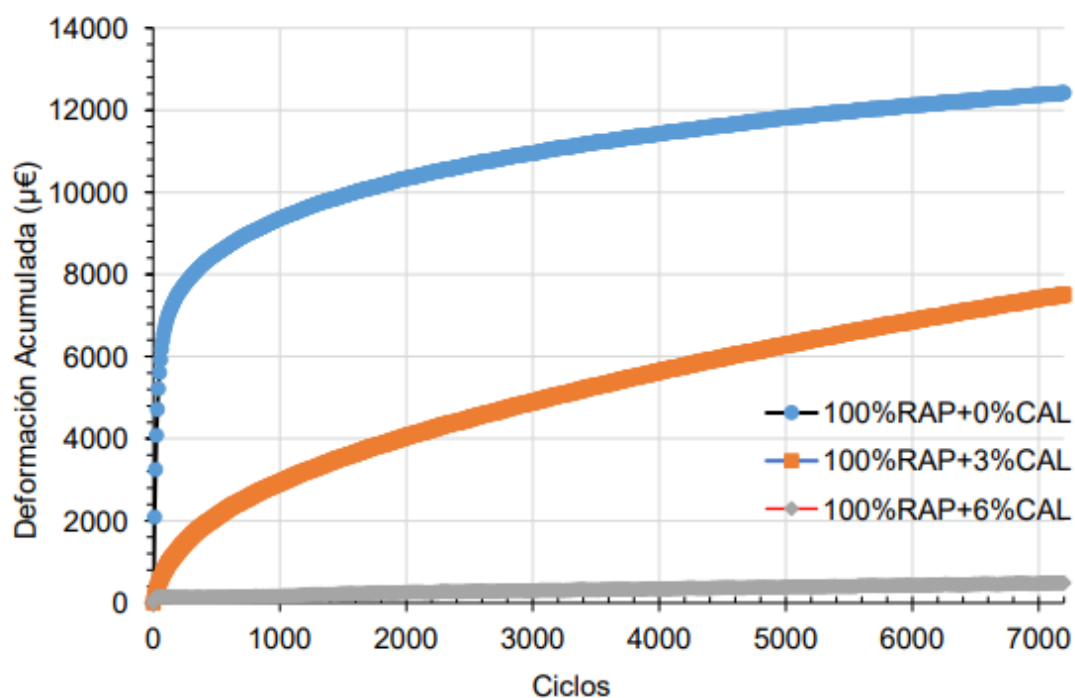
La deformación plástica para la mezcla RAP modificada con emulsión CRL-1 y GCR, da como resultado en esta primera etapa, 0,30 cm en promedio de las seis briquetas. Sin embargo, este valor se debe contrastar con un mayor número de muestras y diferentes dosificaciones de asfalto residual. En este caso, se necesitan más estudios para obtener una conclusión más específica.

9.4. Caso 4. Estudio Del Comportamiento De Mezclas Asfálticas Con 100% Rap Y Adición De Cal Hidratada

Se plantea evaluar el uso de mezclas asfálticas compuesta por 100% de material reciclado y la incorporación de emulsión asfáltica y cal hidrata quienes complementan aspectos mecánicos que determinan el comportamiento de la mezcla.

Se considera pertinente contextualizar acerca del compuesto a analizar. CAL HIDRATADA Es un compuesto que se ha estudiado ampliamente en los últimos años como un agregado en la matriz asfáltica por los beneficios que esta le brinda. A este aditivo se le conoce también como filler.

Figura 7 Ciclos vs Deformacion de las 3 muestras (0%,3% y 6%)



Esta grafica nos permite concluir que a mayores ciclos de cargas en los especímenes se produce una mayor deformación.

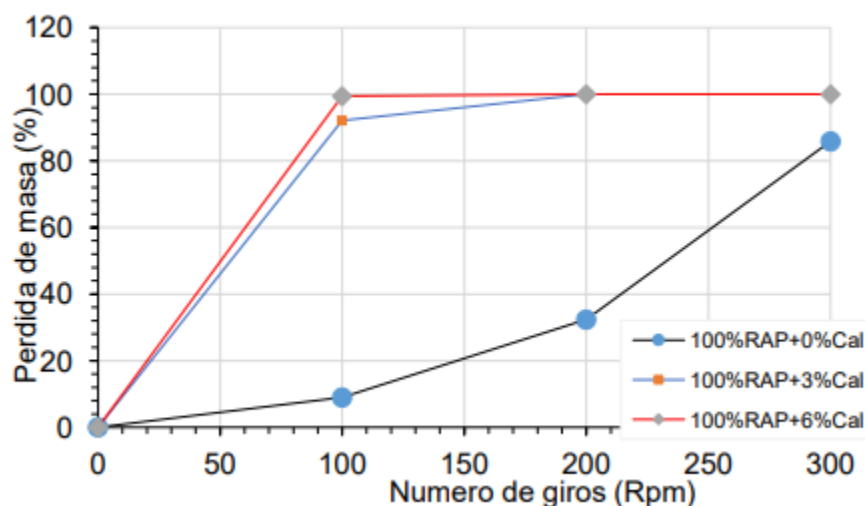
Se evidencia que el contenido de cal hidratada aporato al comportamiento de las curvas de forma positiva ya que se puede decir que a mayor contenido de cal mayor rigidez.

Posterior a esto, se realizó un ensayo de cántabro de pérdida por desgaste, el cual consiste en la fabricación de tres (3) especímenes por cada dosificación, una la mezcla de control con el 0% de cal y las adiciones de cal hidratada con porcentajes del 3% y 6%, seguidamente se introducen en el bombo de la máquina Ángeles sometiéndolas cada uno de los especímenes con su respectiva dosificación al giro el tambor a 100, 200 y 300 RPM, en cada caso se toma la masa correspondiente para cada espécimen. El ensayo permite evidenciar y determinar el valor de la pérdida por desgaste en la parte de los agregados situados en la superficie. También permite valorar directamente la cohesión, trabazón, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico.

9.4.1. Análisis De Resultados:

Podemos observar que las mezclas con el 3% y 6% de adición de cal hidratada presenta un desgaste mayor al 90%, con la aplicación de 100 RPM, mientras que la mezcla de control con 0% de adición de cal, presenta un mejor comportamiento con un desgaste de 85% aproximadamente a las 300 RPM.

Figura 8 Numero de giros vs pérdida de masa



9.4.2. Conclusiones

- Las mezclas asfálticas con porcentajes altos de adición de cal hidratada no se recomiendan para la aplicación en vías de bajos volúmenes de tránsito ya que presentarían deterioros significativos en el pavimento por los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

- Una vez realizados los ensayos y analizados los resultados podemos concluir que 3% y 6% de adición de cal hidratada a una mezcla asfáltica compuesta por 100% RAP son porcentajes muy altos ya que la convierte en una mezcla demasiado abierta.

- A medida que se avanzó en el desarrollo del tema de acuerdo con la literatura pudimos identificar que la Cal es más compatible con el asfalto, pero en pequeñas proporciones.

- Con el uso de emulsiones asfálticas para este tipo de mezclas, se evita utilizar mezclas asfálticas en caliente que aumenta la emisión de agentes contaminantes a la atmosfera.

- Se propone determinar un porcentaje óptimo de emulsión asfáltica para cada contenido de Cal.
- Con la utilización del RAP al 100% en mezclas asfálticas, se está contribuyendo a la reducción de los procesos de explotación y trituración de agregados los cuales afectan de manera considerable al ambiente.

- De acuerdo con el ensayo de Cantabro desarrollado en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia se pudo concluir que este tipo de mezclas en frio conformadas por 100% RAP y adición de cal hidratada no presentan un buen comportamiento en cuanto al desgaste en la máquina de los Ángeles, sin embargo, no se puede ser concluyente o definitivo frente a este tipo de resultados debido a la falta de ensayos a este tipo de mezclas.

9.5. Caso 5

Este es un estudio realizado en Australia y Nueva Zelanda, en el cual se prepararon especímenes de prueba a partir de cinco mezclas, todas las cuales contenían 30% de RAP. Las cinco mezclas incluían una mezcla de control y cuatro mezclas que contenían diferentes agentes de rejuvenecimiento. Las muestras se sometieron a pruebas de superposición, módulo dinámico y seguimiento de ruedas. La adición de agentes de rejuvenecimiento a las mezclas recicladas dio como resultado mejoras notables en la resistencia al agrietamiento y una disminución en el módulo dinámico en comparación con la mezcla de control. Se observó que el rejuvenecimiento disminuyó

ligeramente la resistencia a la deformación en comparación con el control; sin embargo, las medidas de ahuellamiento estuvieron muy por debajo de los límites estándar especificados. Los resultados obtenidos de la presente investigación permiten comprender el efecto del rejuvenecimiento en el desempeño de mezclas asfálticas para superficies que contienen grandes cantidades de RAP. las mediciones de surcos estuvieron muy por debajo de los límites estándar especificados.

9.6. Caso 6

Estudio realizado en Estados Unidos el cual tenía como objetivo estudiar la eficacia de diferentes rejuvenecedores para restaurar las propiedades deseadas de mezclas asfálticas con un alto contenido de material de pavimento asfáltico recuperado (RAP).

Se utilizaron cinco rejuvenecedores diferentes, el aceite de motor usado (WEO), un producto comercial (derivado del aceite de motor para lubricación), el sebo, el aceite vegetal de desecho (WVO) y el aceite de desecho crudo, que pueden clasificarse en tres categorías diferentes que pueden clasificarse en tres categorías diferentes [aceites parafínicos (POs), ácidos grasos (FAs), y aceites altos], fueron considerados para este estudio de investigación.

La evaluación se basó en la influencia del rejuvenecedor en las características de rendimiento de las mezclas bituminosas y asfálticas que contienen Materiales RAP. Se evaluó la eficacia de cada rejuvenecedor comparando las características de rendimiento del betún y se mezcla con la dosis objetivo de rejuvenecedor. Para los resultados de la prueba en las mezclas bituminosas, el VG40 fue el asfalto de control. Este estudio utilizó dosificaciones objetivo obtenidas mediante la optimización de los resultados de las pruebas de viscosidad y punto de ablandamiento en mezclas bituminosas renovadas. En general, se encontró que la dosificación de aceites parafínicos requerida para obtener propiedades físicas similares a las del asfalto virgen es mayor que la de otras categorías, como los ácidos grasos y los tall oils. Aunque las mezclas bituminosas y asfálticas con WEO mostraron una resistencia a la formación de surcos superior en comparación con los materiales vírgenes, se encontró que la resistencia a la fatiga era inferior. La pobre resistencia a la fatiga de WEO (PO 1) se puede atribuir a la presencia de compuestos más volátiles en WEO, lo que da como resultado una pérdida relativamente rápida de la fase de malteno del betún, lo que podría haber causado un envejecimiento en estas mezclas que superó los niveles

deseados. Sin embargo, PO 2, que es un producto comercial que resulta de la adición de compuestos especiales que estabilizan los compuestos volátiles, limitó este exceso envejecimiento de la mezcla bituminosa, por lo que las mezclas se desempeñaron mejor bajo fatiga.

El asfalto se funde y mezcla con todos los rejuvenecedores excepto El tall oil crudo mostró una resistencia a la formación de baches comparable a la de la mezcla de control A excepción de WVO, todos los demás materiales mostraron inferior resistencia a la fatiga en comparación con la mezcla de control si los resultados de la prueba de se tomaron en consideración tanto las pruebas LAS como las ITFT. Se debe tener en cuenta que una comparación de mezclas con material RAP sin rejuvenecedor reveló una mejor resistencia a la fatiga de todas las mezclas. En resumen, cuando el asfalto se mezcla con diferentes rejuvenecedores, pero se usa la misma viscosidad, WEO sin ninguna modificación tiene la menor influencia en la resistencia a la fatiga. Los materiales con rejuvenecedor de otras categorías de aceite de parafina diseñados para usarse como rejuvenecedores mostraron una resistencia a la fatiga y a la formación de surcos cercana a la del material virgen. Los materiales con ácidos grasos, es decir, WVO y sebo, mostraron una resistencia a la fatiga relativamente buena, aunque el sebo fue mejor si se consideró la prueba en betún y WVO resultó ser mejor si se consideraron los resultados de ITFT en mezclas. El sebo crudo dio como resultado material con una resistencia a la formación de surcos inferior y una resistencia a la fatiga comparable a la de la mezcla de control. Una conclusión más amplia del estudio es que la selección de rejuvenecedores con ácidos grasos como componente principal puede dar como resultado mezclas con resistencia a la formación de surcos y a la fatiga en comparación con las mezclas de asfalto virgen, incluso cuando se agrega una alta proporción de RAP. Sin embargo, es importante establecer una dosificación basada en las propiedades objetivo del betún virgen de uso común.

9.7. Caso 7. Mezcla de WMA y RAP

La revista de ciencia e ingeniería de los materiales *Materials* afirma que el RAP (pavimento asfáltico recuperado) “consiste principalmente en hormigones asfálticos retirados de las infraestructuras existentes y, en menor medida, en mezclas desperdiciadas o rechazadas durante los procesos de producción (Tarsi, Tataranni, & Sangiorgi, 2020).” La importancia del RAP se basa en que puede garantizar la sostenibilidad de la construcción de pavimentos asfálticos, debido

a que el RAP está compuesto por áridos y ligante bituminoso, los cuales son unos valiosos recursos no renovables, esto lo podemos evidenciar en una de las grandes potencias a nivel mundial, Estados Unidos, el cual pudo ahorrar 4,1 millones de toneladas de ligante virgen y 78 millones de toneladas de áridos vírgenes en 2018 (Tarsi, Tataranni, & Sangiorgi, 2020). No solo es una alternativa que, al ayudar con la explotación de los recursos naturales, puesto que el RAP ha sido probado en Estados Unidos y Europa como agregados para mezclas asfálticas tanto en caliente, en caliente y frío y para capas no ligadas. Varios estudios han tenido respuestas positivas con mezclas asfálticas que contienen RAP. Esto evidencia que económicamente, también es una alternativa viable, por lo que el RAP a nivel mundial se encuentra en la parte superior de la jerarquía de reciclaje. Es una alternativa que tiene innumerables aspectos positivos, por lo cual debería hacer parte de la ecuación de los materiales para la construcción de pavimentos asfálticos de manera permanente.

En Colombia, el RAP a pesar de que se ha venido implementando cada vez más, aún se desperdicia el potencial que puede tener el material reciclado en la infraestructura vial. El uso de este material se da en un porcentaje menor debido a que no se ha profundizado demasiado en la investigación del material reciclado, lo cual considero que es un desatino, pues se debería inicial a profundizar en la investigación de este tema para así lograr un mayor porcentaje de aprovechamiento del material. A pesar de que el RAP tiene innumerables fortalezas en diferentes ámbitos como se ha mencionado anteriormente, como puede ser el económico y ambiental, se requiere de algunos cambios en la planeación de la construcción de la infraestructura vial. Se necesita de buenos aditivos para proporcionar un material reciclado con estándares altos de calidad y así generar mayor durabilidad del pavimento, por otra parte, los acoplos de este tipo de material pueden establecerse en cualquier lugar, lo que provoca que el material quede expuesto y así provocar que se contamine fácilmente, al depositar el material en lugares que no son aptos, provoca un material contaminado y así usarlo en cualquier relleno en una obra, razón por la cual se genera un desperdicio del material de manera considerable. La humedad que genera el material acoplado se debe tener en cuenta debido a que en la fase de secado o evaporación de la humedad se genera un importante gasto de energía, lo cual provoca a un costo más elevado del material (Mora, G., 2020). Este último aspecto, el consumo de energía, es un gran problema que simplemente con el RAP no se puede resolver. La revista internacional y transdisciplinar *The Journal of Cleaner Production* propone en su artículo *Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review* la tecnología de la mezcla templada de

asfalto y del pavimento asfáltico regenerado (WMA-RAP) (Guo, M., Liu, H., Jiao, Y., Mo, L., Tan, Y., Wang, D., & Liang, M., 2020). La mezcla asfáltica en caliente (WMA) ayuda a solventar algunas carencias que tiene el RAP por sí solo, pues, puede mezclarse y compactarse a baja temperatura para así lograr el objetivo de reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero que esto causa (Kanitpong, K., Charoentham, N., & Likitlersuang, S., 2012). El WMA al igual que el RAP por si mismos tienen algunas falencias, pero trabajando conjuntamente con la mezcla WMA-RAP estas falencias pueden ser solventadas.

En la mezcla WMA diferentes tipos de aditivos actúan dependiendo de la temperatura, ya sea alta temperatura, a baja temperatura e incluso a la que es susceptible a la humedad, en el momento de adicionarle un determinado contenido de RAP a la mezcla, los resultados mostraron un rendimiento satisfactorio en cuanto a la resistencia al agrietamiento a baja temperatura y a la formación de surcos. Sin embargo, las dos tecnologías presentan a su vez algunas desventajas, debido a que, como menciona Capitão en el 2012 en su artículo *Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt* La baja temperatura de producción dará lugar a una adhesión insuficiente entre el ligante asfáltico y el árido, lo que puede afectar a la resistencia a las roderas y a la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica (Capitão S.D., 2012), lo que a su vez se puede complementar con lo dicho por McDaniel en el 2002 “Una gran cantidad de ligante envejecido en el material RAP puede reducir la eficiencia de la mezcla asfáltica y dar lugar a deformaciones prematuras de los pavimentos asfálticos” McDaniel, R. S., Soleymani, H., & Shah, A., 2002). Como se puede apreciar, las mezclas por si solas presentan falencias considerables, pero son falencias que se pueden solventar. Para poder reducir la rigidez de la mezcla que es recuperada, se propuso entonces un rejuvenecedor, un tipo de aditivo asfáltico para poder llegar a restaurar el ligante asfáltico que es envejecido en el WMA-RAP. Este rejuvenecedor se ha venido considerando ampliamente en los últimos años debido a los buenos resultados obtenidos en su capacidad de mejora en el rendimiento de la mezcla asfáltica que contiene RAP.

La tecnología que se busca implementar para combinar estas falencias con resultados positivos en varios aspectos, es la tecnología WMA-RAP, la cual consiste en poder utilizar tanto el WMA como el RAP para poder producir una estructura de pavimento sostenible, pero obteniendo un rendimiento similar al que se obtiene del pavimento asfáltico tradicional (Guo, M., Liu, H., Jiao, Y., Mo, L., Tan, Y., Wang, D., & Liang, M., 2020). En el momento de mezclar las características de WMA y RAP, obtenemos la tecnología WMA-RAP la cual se puede beneficiar

para resolver estos problemas cuando se utilizan juntos Mogawer, W., Austerman, A., Mohammad, L., & Kutay, M. E., 2013). Esta tecnología probó tener una mejor resistencia a las roderas, esto debido a los materiales envejecidos proporcionados por el RAP, los aditivos que proporciona el WMA proporcionan una mejora a la pobre trabajabilidad del RAP, pues, estos reducen una viscosidad del ligante asfáltico envejecido (Monu, K., Ransinchung, G. D., & Singh, S., 2019).

En el artículo *Effect of rejuvenator and mixing methods on behavior of warm mix asphalt containing high RAP content* publicado por la revista *ELSEVIER*, se estudian los efectos que puede tener el rejuvenecimiento en el proceso de reciclaje de pavimentos asfálticos, tanto en caliente en planta como en caliente in situ (Saleh, M., & Nguyen, N. H., 2019). El uso de estos rejuvenecedores para mezcla asfáltica tibia (WMA) es aún muy limitado. Los estudios tenían como finalidad investigar el uso de un rejuvenecedor que normalmente se usaba para (HMA), como actuaban estos rejuvenecedores en la producción de RAP que contiene WMA. HMA la cual es una mezcla asfáltica en caliente, mezcla la cual también sufre debido al daño por humedad, pero la revista *National Academies* en uno de sus artículos nos habla que se está mitigando este daño gracias a papeles de adherencia y la pegajosidad de la película delgada, a pesar de que la comunidad de investigación acepta a los asfaltos como adhesivos y aunque se siga refiriendo a la pegajosidad de los asfaltos, no se ha hecho suficiente para medir la pegajosidad que contiene los diferentes asfaltos y además tratarlos como adhesivos (Kanitpong, K., & Bahia, H. U., 2003). Las pruebas en el laboratorio evaluaban las propiedades reológicas del ligante y los comportamientos mecánicos aplicadas en las mezclas. El comportamiento mecánico existente de las mezclas de WMA con RAP el cual es producido por el rejuvenecedor es el que se comparó con el de un HMA de control y algunas otras mezclas de WMA-RAP que fueron producidas utilizando el aditivo Evotherm WMA. El aditivo "Evotherm" permite la producción de McAsphalt- mezcla asfáltica en tibio Evotherm (WMA) a temperaturas de 50 o C menos, en comparación con la producción de asfalto caliente, así como hasta un 45% el uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) (UKRAVTODOR., 2009). Gracias a ensayos de Módulo de elasticidad, resistencia a la tracción indirecta, ensayo de flexión semicircular y ensayo de fatiga por flexión en cuatro puntos. Los resultados muestran que se puede producir WMA agregando RAP y usando regenerante. Las mezclas de RAP con WMA agregadas producidas con el regenerante fueron superiores a las mezclas de RAP con WMA agregadas producidas con aditivos Evotherm en términos de resistencia al agrietamiento por fatiga. Este estudio investigó más a fondo el efecto de diferentes

métodos de mezcla de regenerante y aglutinante en las propiedades mecánicas de las mezclas de WMA y RAP. Se encontró que cuando el contenido de RAP estaba por debajo del 50%, las propiedades mecánicas de la mezcla no cambiaban significativamente independientemente del método de mezcla. Sin embargo, cuando el contenido de RAP era del 50 % o más, la adición del rejuvenecedor directamente al RAP aumentaba significativamente la resistencia en húmedo de la mezcla WMA RAP. Para los resultados generales, se encontró que agregar el rejuvenecedor al RAP fue más efectivo que agregar el rejuvenecedor al asfalto caliente antes de mezclar (UKRAVTODOR., 2009). Otro estudio publicado por la revista Canadian Science Publishing, nos dice que Los resultados de las pruebas mostraron que Evotherm mejoró en gran medida la resistencia a la humedad de las mezclas WMA-RAP en comparación con HMA. El aumento del contenido de RAP hizo que las mezclas WMA-RAP fueran más rígidas y mejoró la resistencia a la formación de surcos. pero disminuyó la resistencia a la fatiga de las mezclas. Por lo tanto, es necesario determinar el contenido máximo de RAP para garantizar el equilibrio entre las características de fatiga y formación de surcos de las mezclas asfálticas (Lu, X. D., & Saleh, M., 2016).

La implementación del RAP actualmente, aunque ha aumentado con el pasar de los años, sigue siendo insuficiente, el RAP ofrece innumerables beneficios tanto económicos, sociales y ambientales, ya sea con aleaciones como bien se está implementando con WMA-RAP o simplemente con el uso del RAP en la mezcla asfáltica. En Colombia, para la construcción de nuevos proyectos de infraestructura vial, el uso del RAP es bajo, al igual que en América Latina, a pesar de que actualmente se encuentra reglamentado por las especificaciones técnicas generales de carreteras en la normativa INVIAS, sigue siendo un bajo porcentaje de empleo en la infraestructura vial. La mayoría de los temas relacionados con el RAP cuentan con amplias posibilidades de investigación ya que la investigación de los mismos de momento es muy limitada, tanto para los aditivos como lo puede ser el Evotherm o para los rejuvenecedores, aun se deben realizar más investigaciones y así lograr establecer los porcentajes correctos que se deben aplicar de cada uno de estos a la mezcla asfáltica, a pesar de que ya como se mencionó anteriormente a nivel mundial se está investigando y gracias a los resultados de estudios ya se están implementando aleaciones con resultados confiables, pero no es suficiente, aún hay demasiadas investigaciones por realizar y conocer aún más que tantos beneficios nos puede traer esta tecnología de reciclaje,

que como su propio nombre nos indica, favorece a reducir la explotación de recursos naturales, el cual es tema de vital importancia y prioritario para todos en la actualidad y por los próximos años.

10. Análisis Económico

10.1. Caso 1. Alternativa A- “Reciclaje En Frío” In Situ

El reciclaje “in situ” en frío tiene ventajas ecológicas (no necesita afectar las eventuales fuentes de materiales de la zona), económico (bajos costos comparados con reconstrucción) y técnico (los equipos para este proceso han presentado importantes avances tecnológicos).

Para la elaboración de los costos económicos en los que se incurren con la realización de dicha técnica, se tuvo en cuenta las condiciones actuales del mercado, además, de las distancias de acarreo en el sitio del estudio a las que se tiene que transportar los materiales de aporte, sin dejar de lado la ubicación de todas y cada una de las posibles fuentes de materiales que se pudieran utilizar en el proyecto.

Tabla 2 Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA A

VIA	SOPETRAN- PUENTE DE OCCIDENTE	
DATO	CANTIDAD	UNIDAD
DISTANCIA	13300,00	m
ANCHO DE CALZADA	6,50	m
ESPESOR DE RECICLAJE	0,20	m
DOSIFICACION DEL CEMENTO	10,00	Kg/m ²
DISTANCIA DE ACARREO DE TRITURADO (DESDE CONASFALTOS)	65,65	Km
DOSIFICACIÓN 1ER RIEGO	18,00	Kg/m ²
DOSIFICACIÓN 2DO RIEGO	9,00	Kg/m ²
DENSIDAD DEL TRITURADO	1530,00	Kg/m ³

Tabla 3 Presupuesto Alternativa A (Reciclaje en frío in situ)

CONDICIONES CONTRACTUALES INICIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
1	Reciclaje de base granular existente.	m ³	17290	\$ 61,918	\$ 1,070,562,220
2	Cemento como aditivo en estabilización de bases y afirmados.	kg	864500	\$ 695	\$ 600,827,500
3	Imprimir para curado.	m ²	86450	\$ 2,300	\$ 198,835,000
4	Tratamiento superficial primera capa tamaño max 3/4, sin transporte.	m ²	86450	\$ 5,150	\$ 445,217,500
5	Tratamiento superficial segunda capa tamaño max 3/8, sin transporte.	m ²	86450	\$ 5,300	\$ 458,185,000
6	Transporte de material proveniente de la excavación de la explanación, canales, préstamos y materiales de afirmados, sub-base, base, triturado y mezcla asfálticas para distancias mayores de tres mil metros (3000). Material compacto.	m ³ -km	100155	\$ 1,120	\$ 112,173,600
TOTAL COSTOS DIRECTOS					\$ 2,885,800,820

10.1.1. Cálculo De Los Costos “Mantenimiento Convencional”

En lo que respecta a este tipo de intervención se tiene en cuenta todas las variables anteriores, además, de hacerse necesaria la construcción de cunetas de drenaje que garanticen la

evacuación de las aguas de escorrentía y la estabilidad de la estructura del tratamiento superficial doble.

Tabla 4 Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA B)

VIA SOPETRAN- PUENTE DE OCCIDENTE		
DATO	CANTIDAD	UNIDAD
DISTANCIA	13300,00	m
ANCHO DE CALZADA	6,50	m
ESPESOR DE RECICLAJE	0,20	m
DOSIFICACION DEL CEMENTO	10,00	Kg/m ²
DISTANCIA DE ACARREO DE TRITURADO (DESDE CONASFALTOS)	65,65	Km
DOSIFICACIÓN 1ER RIEGO	18,00	Kg/m ²
DOSIFICACIÓN 2DO RIEGO	9,00	Kg/m ²
DENSIDAD DEL TRITURADO	1530,00	Kg/m ³

Tabla 5 Presupuesto Alternativa B (Mantenimiento Convencional)

CONDICIONES CONTRACTUALES INICIALES						
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL	
1	Suministro. Colocación, conformación y compactación de materil de base. No incluye transporte	m ³	12968	\$ 57,000	\$	739,147,500
2	Reciclaje de base granular existente	m ³	17290	\$ 61,918	\$	1,070,562,220

Tabla 5 Continuación

3	imprimación	m ²	86450	\$	2,300	\$	198,835,000
4	tratamiento superficial primera capa tamaño max 3/4, sin transporte.	m ²	86450	\$	5,150	\$	445,217,500
5	Tratamiento superficial segunda capa tamaño max 3/8, sin transporte.	m ²	86450	\$	5,300	\$	458,185,000
6	Transporte de material proveniente de la excavacion de la explanación, canales, préstamos y materiales de afirmados, sub-base, base, triturado y mezcla asfálticas para distancias mayores de tres mil metros (3000). Material compacto.	m ³ -km	367934	\$	1,120	\$	412,085,792
7	Concreto clase D (Cuneta 21 Mpa de 1.0 x 1.0 mt)	m	15500	\$	70,000	\$	1,085,000,000
TOTAL COSTOS DIRECTOS						\$	4,409,033,012

10.1.2. Cálculo De Los Costos “Refuerzo Con Carpeta Mdc-2”

En lo que respecta a este tipo de intervención se tiene en cuenta todas las variables anteriores, además, de hacerse necesaria la construcción de cunetas de drenaje que garanticen la evacuación de las aguas de escorrentía y la estabilidad del refuerzo a colocar como capa de rodadura.

Tabla 6 Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA C)

VIA SOPETTRAN- PUENTE DE OCCIDENTE		
DATO	CANTIDAD	UNIDAD
DISTANCIA	13300,00	m
ANCHO DE CALZADA	6,50	m
REFUERZO CON CARPETA	0.07	m
MDC-2		
ESPESOR DE BASE DE BACHEO	0.15	m
DISTANCIA DE ACARREO DE LA MEZCLA MDC-2 (CONASFALTOS)	65,65	Km
DISTANCIA DE ACARREO DE LA BASE (AGREGADOS SANTA FÉ)	20.65	Km

Tabla 7 Presupuesto Alternativa C (Refuerzo con Carpeta MDC-2)

CONDICIONES CONTRACTUALES INICIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
1	Conformacion de la calzada con mtoniveladora, incluye riego, conformación, bombeo, nivelación y compactación, limpieza y reconstrucción de cunetas y todo lo necesario para la correcta ejecución de la actividad.	m ³	86450	\$ 300	\$ 25,935,000
2	Imprimación	m ²	86450	\$ 2,300	\$ 198,835,000

Tabla 7 Continuación

3	suministro. colocación, conformación y compactación de materil de sub-base granular para bacheo. no incluye transporte.	m ²	5187	\$ 60,000	\$ 311,220,000
4	suministro, colocación y compactación de mezcla densa en caliente tipo mdc-2. no incluye transporte.	m ²	6052	\$ 485,000	\$ 3,449,355,000
5	Transporte de material proveniente de la excavación de la explantación, canales, prestamo y materiales de afirmados, sub-base, base, triturado y mezcla asfaltica para distancias mayores de tres mil metros (3000). Material compacto.	m ³ -km	504393	\$ 1,120	\$ 564,919,628
7	Concreto clase D (Cuneta 21 Mpa de 1.0 x 1.0 mt)	m	15500	\$ 70,000	\$ 1,085,000,000
TOTAL COSTOS DIRECTOS					\$ 5,635,264,628

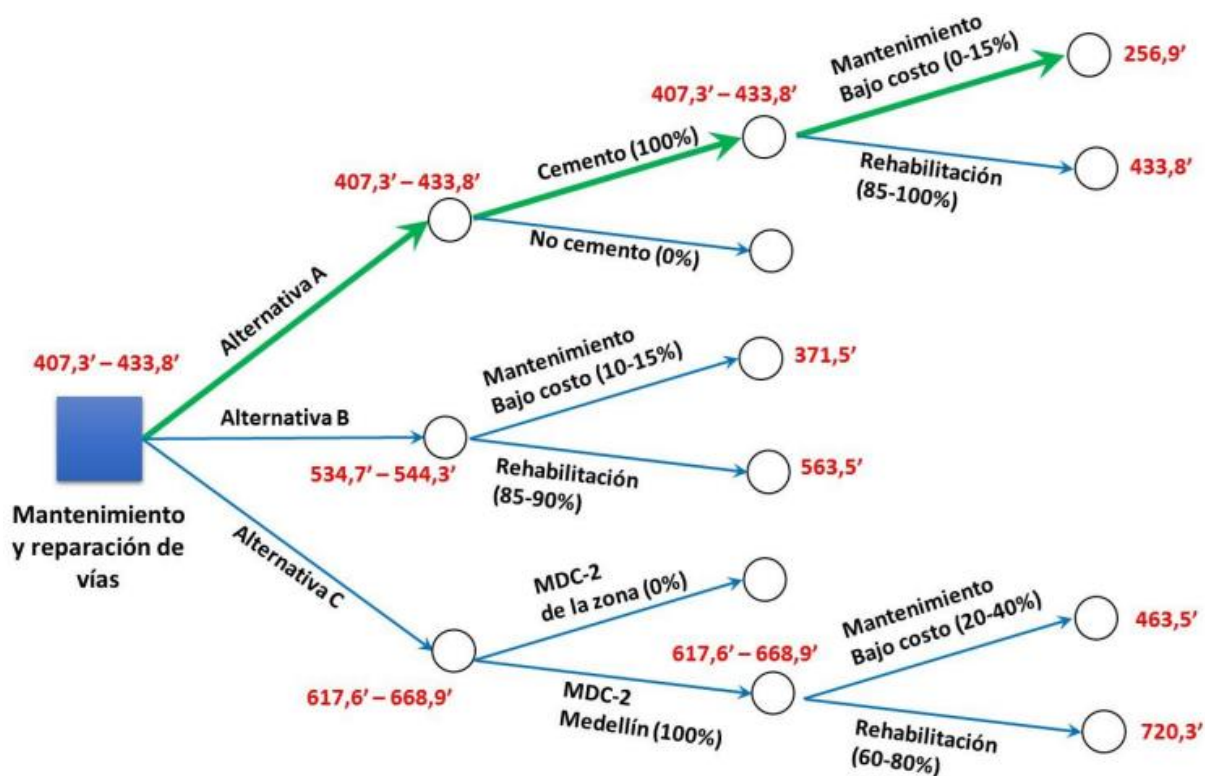
El Costo directo por kilómetro de vía recuperado para cada una de las alternativas es el siguiente:

- **ALTERNATIVA A: \$ 216.977.494**
- **ALTERNATIVA B: \$ 331.506. 242**
- **ALTERNATIVA C: \$ 423.704.107**

10.1.3. Búsqueda De La Mejor Alternativa

En lo que respecta a las probabilidades asignadas para la realización del árbol de decisiones ilustrado en la ilustración 15, es preciso mencionar que fueron adoptadas de acuerdo a la experiencia de algunos expertos consultados, por tal razón y con el grado de incertidumbre al que esto conlleva, se estableció que la mejor manera de aplicarlos era asignándole un rango. Este rango depende de la durabilidad esperada de cada una de las alternativas y el daño que puede o no sufrir la misma en el caso de que no se realice el mantenimiento preventivo adecuado.

Figura 9 Árbol de decisiones para la elección del mantenimiento y reparación de vías secundarias.



Puede observarse en los nodos de incertidumbre del árbol de decisiones que las probabilidades (y por tanto los precios) se han asignado en forma de rangos. Esto se debe a que las probabilidades pueden fluctuar por influencia de condiciones incontrolables. Es decir, pueden cambiar por la ocurrencia de situaciones aleatorias como las condiciones meteorológicas de la zona (especialmente temporadas invernales) y/o la voluntad política para ordenar los mantenimientos preventivos.

De acuerdo con lo encontrado en el árbol de decisiones, puede establecerse que la mejor opción para la reparación y mantenimiento de vías secundarias corresponde a la Alternativa A dado que presenta un intervalo de menor valor en la inversión a realizar. Esta decisión es respaldada con algunos criterios de incertidumbre como:

- Criterio de Plunger
- Criterio de Wald
- Criterio de Laplace

Tabla 8 Criterios de incertidumbre para la toma de decisiones de las alternativas estudiadas.

ACCIONES	ESTADOS		CRITERIOS DE INCERTIDUMBRE		
	Mantenimiento, en millones	Rehabilitacion, en millones	Plunger	Wald	Laplace
ALTERNATIVA A	256.9	433.8	433.8	256.9	345.4
ALTERNATIVA B	371.5	563.5	563.5	371.5	467.5
ALTERNATIVA C	463.5	720.3	720.3	463.5	591.9

Según los resultados de los tres criterios, todos convergen a la conclusión de que la Alternativa A es la que presenta un menor costo para el mantenimiento y la reparación de vías secundarias. Resultado consonante con lo encontrado en el árbol de decisiones anteriormente expuesto.

10.2. Caso 2

Evidencia de la disminución de costos de la utilización del RAP en obra se encuentra en el caso presentado a continuación, en el cual se evaluó el método de reciclado en frío para la rehabilitación de pavimentos en el sector de Cochabamba, mediante dos alternativas convencionales (1-Remoción del pavimento existente previo a un recapado asfáltico. 2-

Saneamiento de la carpeta existente mediante el bacheo y curado de fisuras previo a un recapado asfáltico) y una alternativa no convencional la cual consta de un fresado y reciclado en frío de pavimentos asfálticos (Méndez Revollo, A. A. (2015)).

La metodología utilizada para el análisis se elaboró mediante una matriz en la cual se relacionaron entre sí tres variables: Trabajabilidad, costo y plazo. La alternativa final tuvo un puntaje superior a las otras dos debido a que cuenta con un menor plazo de ejecución, esto debido a un menor tiempo de rehabilitación lo cual induce a un menor tiempo de interrupción de las vías en cuestión. Si se analiza desde el punto de vista ecológico también se encontraron mejoras debido a la minimización de la extracción de materiales debido a su 100% de reutilización de la vía existente y a partir de lo dicho anteriormente, la tercera alternativa presenta un menor costo, con un ahorro del 36% con respecto a la alternativa 1 y un 9% menor que la alternativa 2 (Severich, M., & Valenzuela Galindo, R. A. (2010)).

10.3. Caso 3

En el 2013 se realizaron estudios los cuales valoraban costos y beneficios de la aplicación de mezclas asfálticas con diferentes contenidos de RAP. La base de estos estudios partía de información obtenida en obras en ejecución y ejecutadas de los últimos cinco años (del 2008 al 2013) y que se encontraran ubicadas en CABA y en Gran Buenos Aires en los cuales se emplearan obras con RAP hasta el 20%. Los resultados mostrados a continuación indican un ahorro económico debido al uso del RAP en un 3.3% (Para obras con RAP del 10%) y un 7.5% (Para obras con RAP del 20%) (William et al., (2013)).

Tabla 9 Costos totales de producción de mezclas asfálticas con 0%, 10% y 20% de RAP

OPERACIÓN	0% RAP	10% RAP	20% RAP
FRESADO DE CONCRETO ASFÁLTICO (VARIOS E; ANCHO 3M)	138	138	138
TRANSPORTE DESDE FRENTE DE OBRA, A PLANTA (APROX. 30 KM)	38	38	38
SEPARACIÓN DE RAP (2 TAMAÑOS)		9	9

Tabla 9 Continuación

ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA	133	133	133
MATERIALES DE MEZCLA ASFÁLTICA	405	366	327
TRANSPORTE DE MEZCLA (APROX. 30 KM)	57	57	57
COLOCACIÓN DE LA MEZCLA	142.5	142.5	142.5
COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN [\$/TN + IVA]	913.5	883.5	844.5

Nota. Adaptado de William et al., (2013)

10.4. Caso 4

Por el año 2011 en la ciudad de Medellín se llevaron a cabo estudios en los cuales se evaluó los coeficientes para materiales reciclados y a su vez estabilizados con aditivos químicos los cuales fueron producidos y desarrollados en Colombia. El ingeniero civil egresado de la Universidad Javeriana Jaime Echeverría Gerena, expuso una comparativa entre dos alternativas de rehabilitación para vías existentes en las cuales una solución no tenía RAP y la otra solución sí, los resultados fueron los siguientes:

Figura 10 Vía 1, Alternativas de rehabilitación.

Avenida 51 Entrada principal desde calle 57A hasta el parque calle 51. Itagüí			
Estructura existente	Espesor cm.	Coefficiente adoptado	Numero estructural
subbase de río, sobretamaños	40.0	0.09	1.42
pavimento fallado	7.50	0.18	0.53
Solucion propuesta	Parcheo en 10 cm. en el 33% del area, base asfaltica en 7.5 cm.y sobrecarpeta de rodadura de 6.5 cm.		
Base asfaltica	7.50	0.28	0.83
Carpeta asfaltica	6.50	0.33	0.84
Numero estructural con refuerzo			3.62
Valor solucion propuesta sin imprevistos			\$ 96,000,000
Solucion alterna	Reciclar con crudo y aditivo RCA-10 en 27 cm.y colocar rodadura de 5.5 cm.Se recicló en 33 cm.y se retiraron 6.0 cm. para no subir niveles de la via, este material se utilizó en otras vías como base estabilizada.		
Fecha reciclaje	Mar-94		
subbase de río, sobretamaños	14.0	0.09	0.50
reciclaje con crudo y RCA-10	27.00	0.28	2.98
Carpeta asfaltica	5.50	0.33	0.71
Numero estructural con reciclaje			4.19
Valor solucion ejecutada con reciclaje, incluye imprevistos			\$ 48,000,000

Nota. Adaptado de Echeverría (2011)

Figura 11 Vía 2, Alternativas de rehabilitación.

Carrera 70 entre calle 9 y calle 30. Medellín			
Estructura existente	Espesor cm.	Coefficiente adoptado	Numero estructural
subbase en arenilla	27.00	0.07	0.74
subbase de rio, sobretamaños	37.00	0.09	1.31
pavimento fallado	9.10	0.23	0.82
Solucion propuesta	Hacer parcheo en el 40% del area y reforzar con 15.1 cm. de rodadura		
Carpeta asfaltica	15.10	0.33	1.96
Numero estructural con refuerzo			4.84
Valor solucion propuesta sin imprevistos			\$ 309,000,000
Solucion alterna	Reciclar con crudo y aditivo RCA-10 en 25 cm. y colocar carpeta de rodadura de 6.4 cm.		
Fecha reciclaje	Jul-95		
subbase en arenilla	27.00	0.07	0.74
subbase de rio, sobretamaños	21.10	0.09	0.75
reciclaje con crudo y RCA-10	25.00	0.28	2.76
Carpeta asfaltica	6.40	0.33	0.83
Numero estructural con reciclaje			5.08
Valor solucion ejecutada con reciclaje, incluye imprevistos			\$ 162,000,000

Nota. Adaptado de Echeverría (2011)

Las alternativas expuestas por Echeverría presentan cerca de un 50% en la reducción de costos utilizando la alternativa de reciclado para la rehabilitación de las vías propuestas anteriormente. Además de eso, la capacidad para soportar las solicitudes de tráfico evaluado del pavimento por el numero estructural, cuenta con valores más altos si se compara con el método o la alternativa tradicional (Echeverría., (2011)).

11. Aplicaciones

Según los datos obtenidos por la a Federal Highway Administration (FHWA, por sus siglas en inglés), las principales aplicaciones que tiene el RAP es en la construcción y mantenimiento de carreteras, las cuales están definidas como:

11.1. Agregados En La Base

Para poder producir agregado adecuado a la base o la sub base granular, componentes esenciales de la estructura del pavimento, es necesario un respectivo procesado y mezclado del material virgen. En el 2013 se realizó una intervención de cuatro carreteras de lastre ubicadas en el Condado de Jhonson y el Condado de Sweetwater, ambos en Wyoming, construidas con diferentes porcentajes de RAP en su estructura (entre 50 y 80%). Durante el desarrollo de este proyecto se lograron identificar problemas en el mezclado y la compactación del RAP por lo cual quisieron enfatizar en posibles problemas en la segregación del paterial en un largo plazo (Huntington, G., Khaled, K., Koch, S. (2013)).

11.2. Agregados En Bases Estabilizadas

Al buscar una mayor capacidad mecánica en la mezcla final, el RAP debe ser procesado y mezclado con algunos agentes estabilizadores para al final compactarlo de la mejor manera. En el 2002 en Omán, se realizó una investigación en la cual se utilizaron porcentajes de RAP entre el 70 hasta el 100%, de la cual se concluyó que realizar esta aplicación contribuyó a la disminución en el espesor de la capa requerida en comparación de una base granular convencional (Al-Harty, A., Al-Shamsi, K., Al-Zubeidi, M., Taha, R. (2002)).

11.3. Material De Relleno

No se descarta que el RAP pueda llegar a usarse como relleno de construcción, pero no es una práctica demasiado recomendable pues se puede llegar a subestimar el valor económico que realmente puede aportar el RAP.

11.4. Recuperación De La Profundidad En Su Totalidad

El método del cual se habla consiste en lograr recuperar para luego pulverizar todo el agregado que conforman espesores tanto en la carpeta asfáltica como en las capas granulares. Existen casos en los que se necesita del agregado de materiales vírgenes, los cuales pasan por un proceso de mezclado para lograr tener un material homogéneo.

11.5. Mezcla Asfáltica

Para realizar la aplicación en la mezcla asfáltica existen dos métodos: el procesamiento en planta y el reciclado en campo. El procesamiento en planta consiste en el mezclado de RAP con materiales que sean de la mezcla asfáltica nueva, esto se consigue gracias al procesado del material hasta alcanzar la gradación requerida, previo a un proceso de mezclado con agregado y asfalto virgen, puede llegar a necesitarse en algunos casos de agentes rejuvenecedores con la finalidad de obtener la mezcla requerida. En el caso del segundo método, el material RAP es utilizado con las características con las que fue recuperado directamente del campo. Para este método la superficie del pavimento es fresada hasta llegar a una profundidad de 150 mm, combinado en conjunto con emulsión asfáltica para luego ser colocado y compactado en este caso con el método tradicional. Parra el caso de cualquiera de los dos métodos se debe tener en cuenta el asfalto del RAP en la mezcla final (Miranda-Argüello, F., & Aguiar-Moya, J. P. (2019)).

11.6. Algunas Otras Aplicaciones

El RAP también puede ser utilizado en bloques de asfalto, actuando como adoquines, en investigaciones realizadas en el 2016, las cuales evaluaron el desempeño de un tramo experimental construido completamente por adoquines conformados con material RAP. Se pudieron identificar problemas en la cohesión de la mezcla para contenidos que estuviesen por encima de 25% de RAP. Si se es consistente con este tipo de investigaciones, se puede considerar la utilización de este material, pero para caminos de bajo volumen (Abdelgalil, A., & Nor, H. (2014)).

El reciclaje en pavimentos flexibles resultó ser un aporte valioso desde el punto de vista económico, técnico y ambiental (Kennedy, Tam & Solaimanian. (1998).

12. Beneficios De La Implementación Del Rap

El enfoque de reciclaje resulta ser bastante beneficioso en pavimentos flexibles, en donde se encuentran ventajas de su utilización como material sustituto en ciertas fracciones de la mezcla asfáltica, sus principales beneficios son:

12.1. Beneficios Ambientales

Los beneficios del RAP para este aspecto comprenden:

- La reutilización de material el cual ha culminado su vida útil.
- Considerable disminución del volumen de botaderos.
- Disminución de suministro de material virgen
- Reducción en los procesos de extracción de materias primas limitadas

En Colombia, la técnica es considerada una marca registrada de pavimentos Verdes que sigue por la línea de la sostenibilidad y busca el cumplimiento de la meta Carbono Neutralidad 2100, en ese caso, los beneficios señalados anteriormente pueden ser cuantificados a través de la medición de la huella de carbono. La cual corresponde a una medida de la emanación de dióxido de carbono hacia la atmósfera, la cual es causada directa o indirectamente por una actividad determinada (Wiedmann & Minx, (2008)).

12.2. Beneficios Económicos

En el ámbito económico se asocian los siguientes beneficios:

- Reducción de costos en la pavimentación.
- Ahorro en importación y extracción de materia prima (asfalto y agregados).
- Disminución en los tiempos de intervención.
- Disminución en las importaciones de los productos asociados a la obra.
- Reducción en los porcentajes de ligante asfáltico requerido en la mezcla.

Son considerables las agencias internacionales las cuales han conseguido ahorros significativos en los procesos constructivos debido al uso de RAP (Page & Murphy, 1987 y Al-Qadi, Carpenter & Elseifi, (2007)). Se ha logrado estimar que los costos constructivos pueden

reducirse entre un 14 y un 32 % en mezclas que contienen porcentajes de RAP entre el 20 y 50 % (Kandhal & Mallick, (1997)). Una investigación realizada en el 2015, reporta una disminución de hasta un 7.5 % en el costo de la mezcla producto de la reducción en el uso de materias primas, sin generar deterioro en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas que incorporan RAP.

12.3. Estimación De La Huella De Carbono

Se contemplan los procesos en el análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) de un pavimento que tienen una huella de carbono asociada, estos corresponden a: la extracción de materia prima (particularmente el asfalto) (Cass & Mukherjee, (2011)), el transporte tanto de las materias primas como del producto terminado (Mohod Rosi Mohd & You, 2015), posteriormente el proceso de producción de la mezcla asfáltica y el uso de maquinaria durante la colocación y así mismo su compactación (Kim, Lee, Park, & Kim, 2012). Las emisiones de CO₂ en estas etapas están relacionadas principalmente al consumo generado de energía eléctrica y a la quema de combustibles fósiles. Este tipo de emisiones se les conoce como indirectas. Sin embargo, en el caso del proceso de obtención del combustible, así como del asfalto, naturalmente emanan GEI (Gases Efecto Invernadero), por lo cual son clasificados como emisiones directas (Kang, Yang, Ozer, & Al-Qadi, 2014). Estas emisiones tanto indirectas como directas se pueden estimar mediante el uso de bases de datos y herramientas de cómputo (Mukherjee, Stawowy, & Cass, 2013). Estas herramientas permiten calcular la cantidad de CO₂eq (Dióxido de Carbono Equivalente) que es liberado durante los procesos destilación del crudo de petróleo, así mismo al momento de la producción de energía eléctrica y la quema de combustibles fósiles (U.S. Department of Energy, 2016). Los valores que presentan estas emanaciones están estrechamente ligados al origen del crudo y al tipo de electricidad que se pueda generar (Kim et al, 2012), entonces, se hace necesario corroborar que los datos utilizados correspondan a los materiales empleados en la región. Para lograr calcular la estimación de la huella de carbono del LCA de una mezcla asfáltica se requiere del conocimiento previo del diseño de la mezcla, así como el tiempo, las temperaturas de producción, la cantidad de combustible que es utilizado por los vehículos y maquinaria, entre otros. Para el caso del RAP se debe documentar el proceso de remoción de la superficie, traslado, trituración, incorporación en la mezcla y todos los demás elementos que sean requeridos. Basándose en esta información y los parámetros asociados a cada proceso obtenidos

de diferentes bases de datos, hace posible calcular la cantidad de CO₂eq emanado durante cada etapa.

12.4. Recomendaciones De Diseño Al Uso Del Rap

Debido al aumento de la implementación de RAP en las mezclas asfálticas ha creado la necesidad de la creación e implementación de guías de diseño y pruebas técnicas de campo (McDaniel & Anderson, 2001) se tiene como objetivo definir los procedimientos mínimos requeridos los cuales permiten generar un producto final de calidad. A continuación, se presentan algunas recomendaciones a considerar si se quiere diseñar mezclas asfálticas con RAP.

- Comprender los factores que pueden limitar el uso de RAP en mezclas relacionados con: tipo de mezcla, tipo de vegetación, granulometría, características comunes de los áridos, características de los ligantes, capacidad calorífica, secado y extracción de la vegetación, humedad RAP y la información contenida en el agregado crudo, la temperatura del agregado crudo, la RAP y la temperatura ambiente del agregado crudo.
- Caracterización de materiales RAP mediante la aplicación de métodos de ensayo (Leiva & Vargas, 2017) tales como: extracción por solvente de ligantes (AASHTO T 164), análisis de ligantes bituminosos recuperados para determinar rendimiento (AASHTO clase M 320), determinación del tamaño de partícula a partir de muestras de RAP (AASHTO T 30) y gravedad específica (AASHTO T 84 y T 85) agregados extraídos. En los casos en que no sea posible dicha caracterización, se recomienda mantener el porcentaje de RAP en la mezcla total por debajo del 20%. (Al-Qadi, Carpenter & Elseifi, 2014).
- Considere el cambio de volumen de la mezcla asfáltica después de agregar RAP a la mezcla, ya que el asfalto envejecido pierde propiedades lubricantes y de recubrimiento, lo que lleva a un aumento en el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica. (Cimpeanu, 2017).
- En el caso de asfaltos muy degradados, el contenido de RAP es inferior al 20% y por tanto de alta rigidez, ya que a tales porcentajes la mezcla final no cambia significativamente. (Kennedy, Tam & Solaimanian, 1998 y Arash, Solomon, Karki & Bashin, 2014).

- Utilizar el porcentaje de RAP seleccionado para un diseño de mezcla completa, ya que la determinación del contenido de asfalto virgen RAP requerido en una mezcla asfáltica no debe limitarse solo a estimar el porcentaje de ligante que está presente en el RAP (Huang, 2005), debido a la difusión del asfalto virgen, Porque la capa de asfalto alrededor del agregado grueso tiende a mezclarse con el asfalto original mucho más que con el agregado fino. (Stephens et al. 2001).
- Evaluar la necesidad de la adición de agentes rejuvenecedores para mejorar el rendimiento de los ligantes envejecidos, lo que facilitaría la separación de materiales reciclados y facilitaría el recubrimiento de asfalto virgen (Roberts, Kandhal, Brown, & Kennedy, 1996).
- Mantener buenas prácticas en la gestión de apliamentos de RAP para mantener baja la variabilidad. Sin embargo, también se recomienda almacenar los apliamentos según la fuente, para mantener una mayor homogeneidad. Si se utiliza material de diferentes proyectos, se debe asegurar que se mezcle correctamente (McDaniel y Anderson, 2001), lo que significa procesar mediante trituración o tamizado para ayudar a eliminar el tamaño excesivo.

13. Conclusiones

A nivel nacional, es necesario mejorar el método de empleo del RAP en la estructura del pavimento, pues, se está perdiendo mucho material por oxidación debido a la demora de la implementación del mismo, por lo tanto, se necesita o buscar una implementación de RAP “in situ” o disminuir al máximo posible la exposición del material y así disminuir la pérdida.

Una mezcla con más de 30% de RAP pierde adhesión y cohesión, por lo tanto, definir el porcentaje de RAP en la mezcla hace que cambien las condiciones de lo que se necesita.

La normativa del INVIAS permite un 40% como porcentaje máximo de uso de RAP en vías nuevas, pero en Colombia el promedio de uso de RAP es del 15%, un porcentaje demasiado bajo con respecto al panorama internacional, esto, debido al poco manejo del tema que se tiene en el País y al manejo que se le da al RAP.

En el aspecto económico, la disminución de costos puede ser muy considerable, pues en caso de realizarse el “reciclaje en frío” in situ para el mantenimiento de vías secundarias, se logra un ahorro en los costos de ejecución que puede llegar a ser hasta del orden del 35%, respecto a las demás alternativas planteadas. Aún en el caso de que esta alternativa aumenta el costo en mantenimiento, sigue siendo una disminución superior a las otras dos alternativas generando ahorros al final de la vida útil del orden del 23% en los costos económicos.

El uso de reciclaje y productos estabilizadores para estructuras, son alternativas viables y económicas, ya que permiten la reutilización del material existente en la vía logrando unos nuevos materiales de buena calidad para garantizar una estructura perdurable en el tiempo y que cumpla las especificaciones de diseño, además de obtener una importante reducción de costos por la disminución en los costos de transporte para nuevos materiales a colocar.

El pavimento reciclado tiene una amplia aplicabilidad y duración, pero en nuestro medio aún se sigue diseñando con el mismo criterio de subbase, base granular y pavimento en planta y en caliente, y en algunos casos esporádicos el fresado. La decisión de reutilizar los materiales existentes no ha sido muy utilizada, pero con las actuales exigencias en el campo ambiental y el agotamiento de recursos en algunos sitios de las regiones a intervenir, dará mayor relevancia a su uso y generaran menores costos de construcción. Es sabido que la mayoría de las vías en la ciudad de Bogotá tienen en su estructura RAP, pero gracias a este proyecto se puede evidenciar que el material que se pierde considerable, que el método que se utiliza es inefectivo y de implementarse

alguna de las mezclas mencionadas en el proyecto el porcentaje de RAP en las vías nacionales debería de subir considerablemente sin disminuir la calidad de la infraestructura vial.

14. Recomendaciones

Se recomienda aumentar las investigaciones con respecto al pavimento reciclado, es claro que no se está aprovechando lo mejor posible por lo cual el RAP no puede ser 100% eficiente.

Plantear en el panorama nacional el uso de la maquinaria especializada en pavimento reciclado, logrando una implementación casi inmediata y así buscar la mínima pérdida de material.

Investigar acerca de las veces que se puede reutilizar el pavimento de una vía compuesta por RAP, para así ayudar a minimizar al máximo la explotación de los recursos naturales, obteniendo el beneficio ambiental que la sociedad necesita en tiempo presente de manera inmediata y futuro, pues invertir en este tipo de investigaciones puede ayudar de manera bastante considerable a la reducción de contaminación ambiental sin dejar de lado que cuenta con claros beneficios económicos.

Referencias bibliográficas

- Abdelgalil, A., & Nor, H. (2014, February). The Effect of Joint on Structural Performance of Asphalt Block Pavements. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(8), 1612-1617. https://www.researchgate.net/profile/Ahmed-Eltwati/publication/274050121_The_Effect_of_Joint_Width_on_Structural_Performance_of_Aspalt_Block_Pavements/links/5512d8110cf268a4aeb2ed2/The-Effect-of-Joint-Width-on-Structural-Performance-of-Asphalt-Block-Pavements.pdf
- Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007). Reclaimed asphalt pavement—a literature review. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54607727/rap_2-libre.pdf?1507058200=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DRECLAIMED ASPHALT PAVEMENT A LITERATURE.pdf&Expires=1680474200&Signature=F6P-afWTXkaU0qc~oIJ875wbfc~hTisdeH10rn~IpXAytbZBeACtgFUPRTzVVRBGNUwsrOBonBGWEG95luWNZ3L8x4xBBsNe9fGjRyI7fqdSkPlWIraFYNWrpEnmjar9ixIr1HbD98a4Q7Y6OvavxPeF6oUWxUZmJKQ-xec6JAjcRKNeTJC2DdvmuNlMG2G4o9tZCuWV2hZ2NEc~iz~iE2DBQln7jFzZ-ltmP2nGMOQOiLV8s4mNQxRuhhorZiQh18U8nLGOYQyEcXpUt5ZQxfY9INo5jHrTbuKY2m7Saw6owiIGaPojcuiu0NaLPgxYf~rASlt3puua08LPKVFXtA_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Capitão S.D. (2012). Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *ELSEVIER*, 2(3), 1016-1024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812004308>
- Cass, D., & Mukherjee, A. (2011). Calculation of Greenhouse Gas Emissions for a Highway Construction Operations by Using a Hybrid Life-Cycle Assessment Approach: Case Study for Pavement Operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137 (11), 1015-1025. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000349](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000349)
- Copeland, A. (2011). *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice* (No. FHWA-HRT-11-021). United States. Federal Highway Administration. Office of Research, Development, and Technology. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/40918>

- Duran-Plata, O. D., & Gil-Vergara, G. G. (2022). Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas con 100% RAP y adición de Cal hidratada. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/cce4618c-07dc-4f70-a986-b696f61f71f9>
- Echeverría., (2011). Coeficientes estructurales para materiales reciclados y estabilizados con aditivos químicos desarrollados y producidos en Colombia. Especificaciones constructivas y ahorro en costos. *Ponencia. XVIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos*. <https://docplayer.es/49906108-Xviii-simposio-colombiano-sobre-ingenieria-de-pavimentos.html>
- Gallego Quintana, P. J. (2017). *Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP* (Doctoral dissertation, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito). <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/529>
- Guduru, G., Kumara, C., Gottumukkala, B., & Kuna, K. K. (2021). Effectiveness of different categories of rejuvenators in recycled asphalt mixtures. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(2), 04021006. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JPEODX.0000255>
- Guo, M., Liu, H., Jiao, Y., Mo, L., Tan, Y., Wang, D., & Liang, M. (2020). Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121704. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620317510>
- Hasan, M. R. M., & You, Z. (2015). Estimation of cumulative energy demand and green house gas emissions of ethanol foamed WMA using life cycle assessment analysis. *Construction and Building Materials*, 93, 1117-1124. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815005267>
- Infante, A. S. F., & Santanilla, E. F. (2020). Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR. *Infraestructura Vial*, 22(39), 20-28. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/infraestructura/v22n39/2215-3705-infraestructura-22-39-20.pdf>
- Invias. (2007). *Artículo 461 - 07 Reciclado De Pavimento Asfáltico En Frío En El Lugar Empleando Ligantes Bituminosos*. <http://gerconcesion.co/invias2007/Articulo461-07.pdf>

- Kandahl, P. S., Rao, S. S., Watson, D. E., & Young, B. (1995). *Performance of recycled hot mix asphalt mixtures* (No. NCAT Report No: 95-1). National Center for Asphalt Technology (US). <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/13635>
- Kanitpong, K., Bahia, H. U. (2003). Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72. <https://trid.trb.org/view/698834>
- Kanitpong, K., Charoentham, N., & Likitlersuang, S. (2012). Investigation on the effects of gradation and aggregate type to moisture damage of warm mix asphalt modified with Sasobit. *International Journal of pavement engineering*, 13(5), 451-458. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2011.565058>
- Kennedy, T. W., Tam, W. O., & Solaimanian, M. (1998). Optimizing use of reclaimed asphalt pavement with the Superpave system. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 67. <https://trid.trb.org/view/542936>
- Kim, B., Lee, H., Park, H., & Kim, H. (2012). Framework for Estimating Greenhouse Gas Emissions Due to Asphalt Pavement Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138 (11), 1312-1321. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000549](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000549)
- King, K., Holleran, I., Jayalath, C., & Henning, T. F. (2015). Laboratory performance of rejuvenated asphalt surfacing mixtures containing 30% RAP. *Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*, 24(4), 3-15. <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/INFORMIT.188377783645999>
- Lu, X. D., & Saleh, M. (2016). Evaluation of warm mix asphalt performance incorporating high RAP content. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(4), 343-350. <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/cjce-2015-0454>
- Marín, C. R. (2016). Pavimentos articulados de bloques asfálticos con RAP y análisis estructural a través de un modelo físico experimental. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de ingeniería, Chile. <https://repositorio.uc.cl/xmlui/handle/11534/21386>
- McDaniel, R. S., Anderson, R. M. (2001). *Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual* (No. Project D9-12 FY'97).

- National Research Council (US). Transportation Research Board.
<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/15417>
- McDaniel, R. S., Soleymani, H., & Shah, A. (2002). Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) under Superpave specifications. *Washington, DC: Federal Highway Administration (FHWA/IN/JTRP-2002/6)*.
- McMillan, C., & Palsat, D. (1985). Alberta's experience in asphalt recycling. In *Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association* (Vol. 30, pp. 148-167).
https://www.academia.edu/34749328/RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT_A_LITE_RATURE_REVIEW
- Méndez Revollo, A. A. (2015). Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas.
<https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/13208>
- Miranda-Argüello, F., & Aguiar-Moya, J. P. (2019). mezclas asfálticas con rap: pavimentos asfálticos reciclados.
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1421/Boletin%201%20%20Mezclas%20asf%C3%A1lticas%20con%20RAP.pdf?sequence=1>
- Mogawer, W., Austerman, A., Mohammad, L., & Kutay, M. E. (2013). Evaluation of high RAP-WMA asphalt rubber mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup2), 129-147.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2013.812846>
- Monu, K., Ransinchung, G. D., & Singh, S. (2019). Effect of long-term ageing on properties of RAP inclusive WMA mixes. *Construction and Building Materials*, 206, 483-493.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819303824>
- Mora-Mora, J. A. (2021). Aprovechamiento de reciclado RAP: para mejoramiento de las vías terciarias en Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/1d1b41dd-3e3c-4e24-b39b-6bec92ea955e>
- Mukherjee, A., Stawowy, B. & Cass, D. (2013). Project Emission Estimator. Tool for Contractors and Agencies for Assessing Greenhouse Gas Emissions of Highway Construction Projects. *Transportation Research Record*, 2366, 3-12.
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/2366-01?journalCode=trr> a

- Restrepo Sierra, H. A., & Stephens Zapata, S. A. (2015). Estudio de las ventajas economicas del reciclaje en frío IN SITU de pavimentos asfálticos. *Monografía, UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN, MEDELLÍN*. <https://repository.udem.edu.co/handle/11407/2163>
- Saleh, M., & Nguyen, N. H. (2019). Effect of rejuvenator and mixing methods on behaviour of warm mix asphalt containing high RAP content. *Construction and Building Materials*, 197, 792-802. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818328964>
- Severich, M., & Valenzuela Galindo, R. A. (2010). Rehabilitación de pavimentos asfálticos de la ciudad de Cochabamba mediante el fresado y reciclado en frío. *Journal Boliviano de Ciencias*, 7, 29. http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?pid=S2075-89362010000300007&script=sci_arttext&tlng=es
- Smiljanic, M., Stefanovic, J., Neumann, H. J., Rahimian, I., & Jovanovic, J. (1993). Ageing of asphalt on paved roads; Characterization of asphalt extracted from the wearing course of the Belgrade-Nis highway. *Erdoel und Kohle Erdgas Petrochemie vereinigt mit Brennstoff-Chemie;(Germany)*, 46(6). <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/6100332>
- Stephens, J. E., Mahoney, J., & Dippold, C. (2001). *Determination of the PG Binder Grade to Use in a RAP Mix* (No. JHR 00-278). Connecticut. Dept. of Transportation. <https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/14366>
- Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review. *Materials*, 13(18), 4052. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/18/4052>
- UKRAVTODOR. (2009). *Características de McAsphalt-Evotharm Mezcla Asfáltica Tibia con aditivo "Evotharm-3G"*. Administración Estatal de las Carreteras de Ucrania. <http://www.cantat-associates.com/sites/default/files/documents/evotharm/spanish/Ukrania.pdf>
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of ‘carbon footprint’. *Ecological economics research trends*, 1(2008), 1-11. [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=GCKU1p_6HNwC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Wiedmann,+T.,+%26+Minx,+J.+\(2008\).+A+Definition+of+%27Carbon+Footprint.+En+Economics+Research+Trends+\(p%C3%A1gs.+1-](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=GCKU1p_6HNwC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Wiedmann,+T.,+%26+Minx,+J.+(2008).+A+Definition+of+%27Carbon+Footprint.+En+Economics+Research+Trends+(p%C3%A1gs.+1-)

11).+Hauppauge+NY:+Nova+Science+Publishers.&ots=D1GVJL9nKp&sig=6KIuo3TG95vIDkcIi_y_8bF5AM4&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Williams E.; Filippertti M.B.; Larsen D.; Capra B.; Pendon M.; Couselo R. (2013) Proyecto de reciclado de pavimento: Costos pertinentes y beneficios. Centro Tecnológico de Desarrollo Regional. Facultad Regional San Rafael - Universidad Tecnológica Nacional. Los Reyunos, San Rafael, Mendoza, Argentina. <https://xdoc.mx/documents/proyecto-de-reciclado-de-pavimento-costos-pertinentes-5e9a168c80dea>