SEGUIMIENTO A TRAMOS DE VÍA DE BAJOS VOLÚMENES CON MEZCLAS ELABORADAS CON RAP PROVENIENTES DE LA UMV EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

Estudio de caso

CRISTIAN LEONARDO VARGAS FORERO

KEVIN DAILUBER RODRIGUEZ OROZCO

Proyecto de grado para optar al

Título de Ingeniero Civil

Director:

Ing. MSc. PhD WILMAR DARIO FERNANDEZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2024

Nota de aceptación

El trabajo de grado denominado "SEGUIMIENTO A TRAMOS DE VÍA DE BAJOS VOLÚMENES CON MEZCLAS ELABORADAS CON RAP PROVENIENTES DE LA UMV EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ" presentado por los estudiantes Kevin Dailuber Rodríguez Orozco y Cristian Leonardo Vargas Forero, con códigos 20192579024 y 20192579020 respectivamente, para optar por el título de Ingeniero Civil que otorga la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, cumple con los requisitos solicitados y recibe aprobación.

_____

Wilmar Dario Fernández Gómez

Director del Proyecto

_____

Jurado

Bogotá D.C., abril del 2024

TABLA DE CONTENIDO

1 RESUMEN 8
2 INTRODUCCIÓN 10
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 11
2.2 JUSTIFICACIÓN 14
2.3 OBJETIVOS 16
3 LOCALIZACION 17
3.1 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO 18
3.1.1 LOCALIDAD 18
3.1.1 Unidad de Planeación Zonal (UPZ) 19
3.2 USO DEL SUELO 19
4 ANTECEDENTES 21
4.1 MARCO TEORICO 21
4.1.1 GESTION DE PAVIMENTOS 21
4.1.2 PAVIMENTO 23
4.1.3 RCD (Residuos de Construcción y Demolición) 24
4.1.4 PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO (RAP) 25
4.1.5 UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO VIAL (UAERMV) 27
4.1.6 FUENTES DE RAP UTILIZADAS EN LA CIUDAD: 28
4.1.7 PARÁMETROS DE CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO PARA VÍAS CONSTRUIDAS CON RAP 29
4.1.8 PATOLOGIAS PAVIMENTO FLEXIBLE 35
4.2 MARCO DE REFERENCIA 45
4.2.1 ESTUDIOS EN COLOMBIA 45
4.2.2 UMV (Unidad de mantenimiento Vial) 47
4.2.3 ESTUDIOS EN EEUU 48
5 METODOLOGIA 50
5.1 DESCRIPCION DE SITIO INSPECCIONADO “VISITAS A CAMPO” 52
5.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN CAMPO 55
5.3 MATERIALES Y MÉTODOS 56
5.3.1 CONFIGURACIONES DEL EQUIPO 56

5.3.2 PROCESO DE CAPTURA DE DATOS: 57
5.3.3 SINCRONIZACIÓN TEMPORAL: 57
5.3.4 FILTRADO DE DATOS: 58
5.3.5 GENERACIÓN DE REGISTROS GEORREFERENCIADOS: 58
6 RESULTADOS 59
6.1 CICLO DE VIDA 59
6.1.1 ESTADO INICIAL 59
6.1.2 OBTENCION DE RAP 61
6.1.3 CONSTRUCCION 64
6.1.4 ANALISIS DE COSTOS 68
6.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN 70
7 ANALISIS Y DISCUSION 76
8 CONCLUSIONES 84
9 BIBLIOGRAFIA 87
10 ANEXOS 89
10.1 ANALISIS DE PATOLOGIA USME LA REQUILINA (XLSX) 89
10.2 SEGUIMIENTO DE ACUERDO AL ESTADO DE LA VIA (PDF, DGW) 89
10.3 REGISTRO FOTOGRAFICO 89

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 11
Figura 2 13
Figura 3 13
Figura 4 14
Figura 5 17
Figura 6 17
Figura 7 20
Figura 8 20
Figura 9 23
Figura 10 27
Figura 11 30
Figura 12 31
Figura 13 32
Figura 14 33
Figura 15 34
Figura 16 35
Figura 17 36
Figura 18 38
Figura 19 39
Figura 20 40
Figura 21 42
Figura 22 42
Figura 23 43
Figura 24 44
Figura 25 50
Figura 26 53
Figura 27 56
Figura 28 57
Figura 29 58
Figura 30 59
Figura 31 60

Figura 32.....61
Figura 33.....61
Figura 34.....62
Figura 35.....62
Figura 36.....63
Figura 37.....63
Figura 38.....64
Figura 39.....64
Figura 40.....65
Figura 41.....65
Figura 42.....66
Figura 43.....67
Figura 44.....67
Figura 45.....71
Figura 46.....72
Figura 47.....73
Figura 48.....73
Figura 49.....74
Figura 50.....75
Figura 51.....76
Figura 52.....77
Figura 53.....78
Figura 54.....80
Figura 55.....81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación RCD Fuente: Decreto 838 de 2005 y Decreto 4741 de 2005. Secretaría Distrital de Ambiente 24
Tabla 2 clasificación según las clases de subbase granular 30
Tabla 3 Clasificación según las clases de base granular 31
Tabla 4 Intervención total de la vía, Fuente: propia 54
Tabla 5 intervenciones filtro francés 66
Tabla 6 cantidades de obra, Fuente: propia 68
Tabla 7 presupuesto RAP, Fuente: propia 69
Tabla 8 presupuesto MDC-19, Fuente: propia 70
Tabla 9 comparación presupuestos, Fuente: propia 70
Tabla 10 clasificación imágenes, Fuente: propia 80

1 RESUMEN

En los últimos veinte años, el estudio y utilización de Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) en la construcción y rehabilitación de pavimentos creció debido a sus beneficios económicos y ambientales, al contribuir a la reducción de residuos y disminuir la demanda de materiales vírgenes. El proyecto de grado se centró en la evaluación del desempeño del RAP en un tramo de vía de bajo volumen de tránsito, en la Zona Rural de la ciudad de Bogotá, esta vía fue intervenida con RAP proveniente de la sede de producción La Esmeralda de la Unidad de Mantenimiento Vial (UMV). El material reciclado se sometió a diferentes ensayos y se elaboró una fórmula de trabajo para aplicarlo diferentes vías, esta etapa se desarrolló en la primera fase de este programa de investigación. Para la etapa de evaluación del desempeño del pavimento en estudio, se utilizó un sistema de inventario vial que incluye receptores de GPS y cámaras alta definición desarrollado por la Universidad Distrital. En la evaluación, midiéndose midieron parámetros como patologías, calidad de materiales y proceso constructivo. La inspección comparó estos datos con estándares de diseño, recopilando información sobre la construcción y costos asociados. Los resultados contribuyen a la comprensión del comportamiento del RAP en vías de bajo volumen de tránsito, proporcionando una base para decisiones futuras en el diseño y construcción de pavimentos sostenibles que promuevan la utilización de materiales reciclados en la infraestructura vial de la ciudad de Bogotá.

Palabras clave: Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP), patologías, Unidad Mantenimiento Vial (UMV), bajo volumen de tránsito, Bogotá, Estándares de diseño.

ABSTRACT

In the last twenty years, the study and use of Recycled Asphalt Pavement (RAP) in the construction and rehabilitation of pavements have grown due to its economic and environmental benefits. RAP contributes to waste reduction and decreases the demand for virgin materials. The focus of this thesis was the performance evaluation of RAP on a low-traffic volume road in the rural area of Bogotá. This road was treated with RAP sourced from the La Esmeralda production site of the Road Maintenance Unit (UMV). The recycled material underwent various tests, and a working formula was developed for its application on different roads. This phase was carried out in the initial stage of the research program. For the performance evaluation stage of the pavement under study, a road inventory system was employed, incorporating GPS receivers and high-definition cameras developed by the District University. During the evaluation, parameters such as pathologies, material quality, and construction processes were measured. The inspection compared these data with design standards, gathering information on construction and associated costs. The results contribute to understanding the behavior of RAP on low-traffic volume roads, providing a foundation for future decisions in the design and construction of sustainable pavements that promote the use of recycled materials in the road infrastructure of Bogotá.

Keywords: Recycled Asphalt Pavement (RAP), pathologies, Road Maintenance Unit (UMV), low-traffic volume, Bogotá, Design Standards.

2 INTRODUCCIÓN

En la última década, el uso de pavimentos reciclados se ha popularizado debido a su bajo costo de producción y su bajo impacto ambiental en comparación con los pavimentos convencionales. En este contexto, se ha desarrollado un proyecto cuyo objetivo fue evaluar el desempeño de mezclas elaboradas con RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) proveniente de desechos de obras de la UMV (Unidad de Mantenimiento Vial), utilizadas en las vías de bajo tráfico en la localidad de Sumapaz. En la búsqueda de lograr este objetivo, se ha realizado una metodología que incluye la selección y caracterización de los materiales, el análisis de mezclas con diferentes porcentajes de RAP y la realización de salidas al campo utilizando equipos de la UMV sede La Esmeralda y equipos de la Universidad Distrital Sede Tecnológica. Además, se llevó a cabo una revisión bibliográfica y un análisis de la información obtenida a partir de los registros y muestras de campo, identificando repeticiones, confirmaciones, vacíos y falencias, para centralizar la información sobre el objeto de investigación.

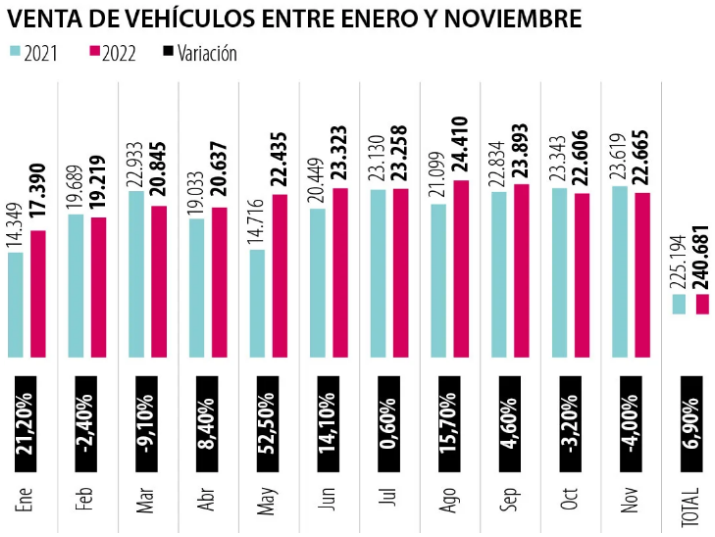
Los resultados obtenidos tienen como enfoque el desarrollo de diversas propuestas basadas en las alternativas planteadas para implementar RAP en las vías de bajos volumen de tránsito en la zona Rural de Bogotá, contribuyendo al desarrollo de alternativas sostenibles y económicas en su construcción y mantenimiento.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la última década la ciudad ha experimentado un crecimiento exponencial de su población y con esto un crecimiento de los medios de transporte y su uso, esto debido a diferentes factores sociales migratorios, los cuales generan la entrada a la ciudad de extranjeros que posteriormente llegan a hacer parte de la dinámica del transporte privado y público de la ciudad. Adicional a esto hemos visto la integración de nuevos sistemas de transporte que han cambiado las dinámicas de la movilización en la ciudad, con esto nos referimos al sistema de transporte integrado y a la construcción del metro, lo cual genera una reducción en los carriles de algunas troncales principales, y sumado al crecimiento de la población, vemos como el transporte en la ciudad se encuentra colapsado, ya que según el último reporte del Diario Portafolio *(ver figura 1)*, "las ventas de vehículos en Colombia durante 2022 aumentaron un 6.90% en comparación con 2021, ya que entre enero y Noviembre se comercializaron 240.681 vehículos frente a los 225.194 que se vendieron en el mismo periodo del año anterior" (Diario Portafolio , 2023).

Figura 1

Venta vehículos 2021-2022.



Nota. adaptado de venta de Vehículos entre enero y noviembre, por Editorial La Republica, 2022, https://acortar.link/XFgYac.

Sumando la circulación de vehículos existentes vemos un colapso en la capacidad de las vías,

lo que a su vez genera un deterioro mayor en las vías debido a la cantidad de vehículos y a las cargas excesivas a las que son sometidas las diferentes vías. Por estos motivos vemos un deterioro constante en las vías de la ciudad, las cuales deben estar en constante reparación y vigilancia para así evitar un mayor colapso del transporte y poder evitar posibles accidentes.

Una vez mencionadas las causas del porqué las vías deben estar sometidas a constantes reparaciones, se observó la necesidad de emplear nuevos métodos y mecanismos que generen un impacto económico y ambiental positivo, que puedan tener un uso sostenible y amigable con el medio ambiente, con una fácil obtención y que su método de utilización sea lo más práctico posible con el fin de acelerar estos procesos de reparación.

De acuerdo a esto, distintas empresas, investigadores y académicos han desarrollado métodos y mecanismos que facilitan el uso de un pavimento asfáltico reciclado o conocido por sus siglas "RAP", que traduce (Reclaimed Asphalt Pavement), *(ver figura 2)* el cual es un material que se recupera luego de realizar un proceso de fresado, o demolición de carpetas asfálticas producto de construcciones o rehabilitaciones, al cual se le da un tratamiento posterior para prolongar su vida útil en vías terciarias, lo cual ha tenido un impacto a importante en la construcción de carreteras y carreteras urbanas ya que puede proporcionar una solución rápida, duradera y segura para los vehículos y peatones, y adicional a esto tiene una serie de ventajas económicas y ambientales ya que se ha convertido en una alternativa popular a la construcción de nuevas carreteras y la rehabilitación de carreteras existentes

Figura 2

Implementación RAP Usme la Requilina, fuente: UMV



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Además, el uso del RAP puede tener un beneficio económico por encima de los materiales nuevos, ya que este tipo de material lo podemos encontrar con gran facilidad debido a que constantemente se están realizando mantenimientos viales que conllevan a un proceso de fresado y demolición del pavimento, lo cual genera la materia prima para la producción del RAP, lo cual se traduce en un menor gasto energético y en menos recursos para su producción, Actualmente se está usando en Colombia en vías terciarias como una alternativa de reciclaje del asfalto extraído, lo cual conlleva a una reducción en el impacto ambiental generado en la fabricación de nuevos asfaltos y en un beneficio para las comunidades que no cuentan con vías pavimentadas, demostrando resultados eficientes en términos ambientales, ingenieriles y económicos.

Figura 3

Planta UMV sede La Esmeralda, Fuente: propia



A pesar de la existencia de amplios estudios en la fabricación y dosificación de mezclas asfálticas con RAP aún se ven limitados en la evaluación del desempeño a mediano y largo plazo, debido a que su uso es relativamente nuevo y los estudios y análisis de comportamientos realizados a las vías construidas con RAP en periodos iguales o mayores a 3 años son reducidos. Por tanto, se hace necesario indagar sobre el desempeño de los pavimentos construidos con esta tecnología y en ese sentido el objetivo de esta investigación se orientó a evaluar el comportamiento y desempeño en varios aspectos de algunos tramos viales construidos con RAP.

2.2 JUSTIFICACIÓN

Emergencia del problema de estudio: El problema de la construcción y rehabilitación de vías urbanas y rurales es de gran importancia debido al crecimiento acelerado de las ciudades y el aumento del tráfico vehicular. Las infraestructuras viales se ven sometidas a un desgaste constante y requieren mantenimiento periódico, al igual que las vías construidas en afirmado las cuales necesitan una rápida intervención. Es esencial abordar este problema de manera sostenible, considerando la escasez de recursos naturales y el impacto ambiental de la construcción tradicional.

Figura 4

Vía en afirmado Usme la Requilina antes de intervención



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Viabilidad del proyecto: La realización de este proyecto es altamente viable. Existen numerosos

estudios e investigaciones previas que respaldan el uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías urbanas. Además, se han desarrollado técnicas y normativas que permiten una implementación segura y eficiente del RAP en proyectos viales. Estas bases sólidas brindan confianza en la viabilidad y relevancia de este estudio.

Población beneficiada: El proyecto de uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías urbanas beneficia a la población en general de las ciudades. El mantenimiento y construcción de vías urbanas sostenibles mejoran la calidad de vida de los residentes, garantizando infraestructuras seguras y duraderas. Además, el enfoque en la reducción del impacto ambiental contribuye a la preservación del entorno y la salud de la comunidad.

Beneficios metodológicos del estudio: Este estudio proporciona beneficios metodológicos al investigar y evaluar la viabilidad técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP). La investigación implicó el análisis de literatura científica, estudios de casos y recopilación de datos relevantes. Además, se realizó análisis visuales para evaluar las propiedades y características del RAP. Este beneficio metodológico permitió generar conclusiones fundamentadas y recomendaciones prácticas.

Beneficio profesional, personal o disciplinario: Este estudio ofrece beneficios profesionales, personales y disciplinarios. A nivel profesional, el conocimiento adquirido en la investigación puede ser aplicado en la práctica profesional de ingeniería civil, promoviendo soluciones más sostenibles y eficientes en la construcción de vías urbanas. A nivel personal, la participación en un proyecto de investigación brinda la oportunidad de desarrollar habilidades de investigación, análisis crítico y resolución de problemas. Además, contribuye al desarrollo disciplinario al ampliar el conocimiento y la comprensión de la aplicación del RAP en el campo de la ingeniería vial

2.3 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el rendimiento y el comportamiento de mezclas utilizando RAP obtenido de residuos de obras de la Unidad de Mantenimiento Vial (UMV), aplicadas en vías con poco tráfico dentro de la red vial local de Usme la Requilina.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la información correspondiente de las vías construidas con RAP, incluyendo los ensayos de laboratorio y diseños de pavimentos.

- Realizar el análisis del ciclo de vida de los pavimentos construidos con RAP, en las vías rurales propuestos en el caso de la vía Usme la Requilina, en el tramo comprendido entre la CL 137 entre la KR 2A y la DG 119A sur,

- Evaluar el desempeño de los pavimentos construidos en las vías objeto de estudio.

3 LOCALIZACION

La zona objeto de estudio se encuentra en una vía con poco tránsito en una zona rural de Bogotá., tramo comprendido desde la **CL 137 entre la KR 2A y la DG 119A** sur. (Ver Ilustraciones 1 a 2).

Con una longitud total de 5,47 Km, con el uso del suelo Tipo Residencial y Urbano, definido por Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Bogotá

Figura 5

Localización General vía de estudio, Fuente: propia

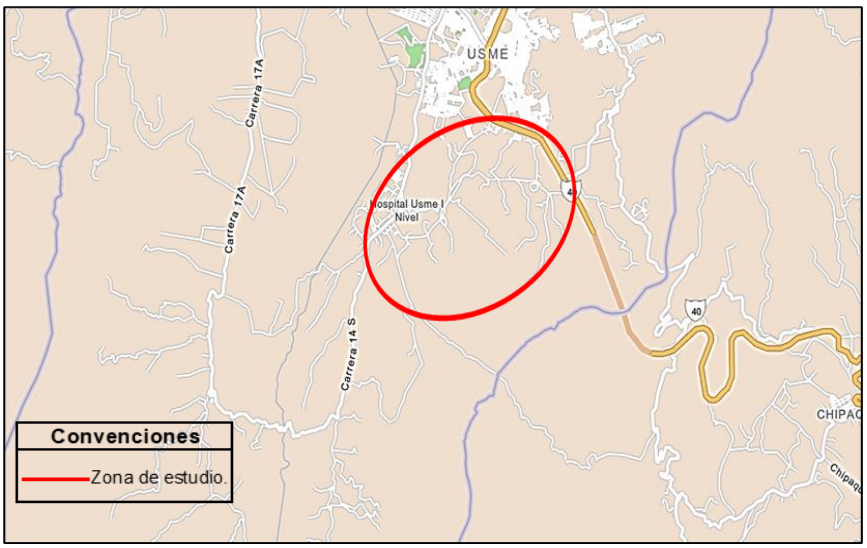


Figura 6

Localización específica del sector, Fuente: propia



3.1 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

La zona a estudiar se sitúa en la Zona rural de Bogotá localidad 05 de Usme, en los CIV`s: 5007652, 5007659; 5007662; 5007663; 5008405; 5007978; 5007677; 5009583; 5009581; 5010061; 5010062; 5009848; 5009998 y 5009989, con una longitud total de 5,47 Km, con el uso del suelo Tipo Residencial y Urbano, definido por Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Bogotá.

3.1.1 LOCALIDAD

Situada en el sur de Bogotá, la comunidad 5 Usme tiene límites al norte con San Cristóbal (4), Rafael Uribe Uribe (18) y Tunjuelito (6), al oriente con Chipaque y Une, al sur con Sumapaz (20) y al occidente con Ciudad Bolívar (19), rodeada por el Río Tunjuelo y los municipios de Pasca y Soacha. La zona abarca 21.506 hectáreas (ha), de las cuales 2.120 son suelo urbano, 902 son suelo de expansión urbana y los 18.483 restantes son suelo rural. Entre las áreas con mayor superficie dentro del Distrito Capital, Usme ocupa el segundo lugar, mientras que Sumapaz ocupa el primer lugar. De las siete UPZ que existen en Usme, cinco son residenciales de urbanización incompleta, una es predominantemente dotacional y la última es de desarrollo. La UPZ con mayor participación en suelo es la 61-Ciudad de Usme 30,63% (925,5 ha), con 33 barrios. La UPZ 57 Gran Yomasa tiene un 17,73 % (535,8 ha), con 94 barrios. (Corredor, 2013)

3.1.1 Unidad de Planeación Zonal (UPZ)

El sitio de estudio es La UPZ-61. La ciudad de Usme se extiende por 925,5 hectáreas al oeste de Usme, lo que representa el 30,6% del área total de las UPZ de la zona. La UPZ limita con las UPZ Comuneros, Alfonso López y Gran Yomasa en el norte; en el oriente y sur, con la zona rural de la localidad; y en el occidente, con la UPZ Monte Blanco y la zona rural de Ciudad Bolívar (en medio del Río Tunjuelo). En el año 2002, la UPZ registró 1.516 unidades de uso en la base de datos de la UAECD, lo que equivale a 126.712 m2 de construcción. En 2012, la UPZ registró 5.851 unidades de uso, lo que equivale a 388.044 m2 de construcción, lo que representa un aumento de 4.335 unidades de uso y un aumento de 261.333 m2 de construcción. (Corredor, 2013)

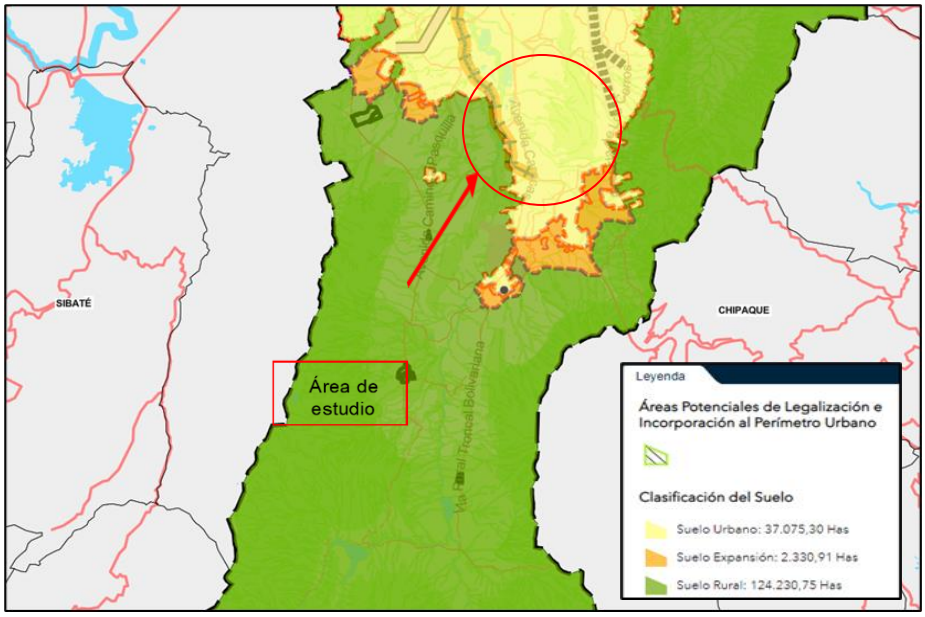
3.2 USO DEL SUELO

Esta UPZ está en proceso de desarrollo. Durante los años 2002 y 2012, la unidad de planeación principalmente utilizó viviendas NPH (No propiedad Horizontal). Después, se observó un incremento notable en la utilización de residencias en propiedades sujetas al régimen de propiedad horizontal.

Como se puede observar en la *figura 7 y 8,* esta UPZ se caracteriza por presentar áreas poco desarrolladas con grandes áreas de terreno ocupadas. La mayoría de las residencias en uso son viviendas unifamiliares construidas mediante autoconstrucción, mostrando una clara inclinación hacia la edificación de edificios de hasta seis pisos bajo el régimen de propiedad horizontal. Este escenario corrobora la descripción de la "UPZ 61 - Ciudad de Usme" como un proyecto residencial caracterizado por una urbanización incompleta, con barrios periféricos no consolidados, situados en los estratos 1 y 2, en proceso de desarrollo residencial.". (Corredor, 2013)

Figura 7

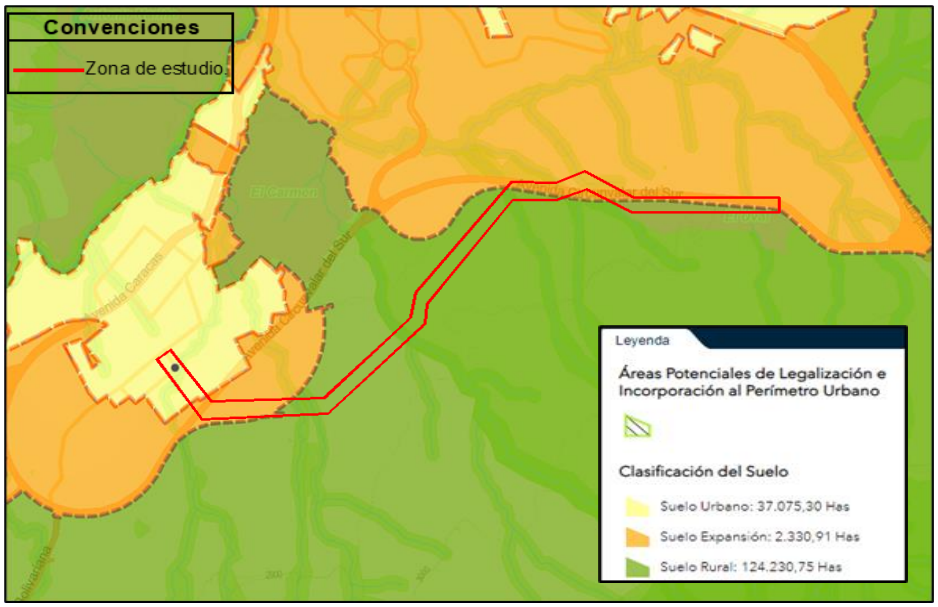
Mapa general del uso del suelo, Fuente: propia



Nota. Imagen tomada del Visor Geográfico de la secretaria Distrital de Movilidad, 2024, https://sig.simur.gov.co/Visor_DCV/.

Figura 8

Mapa especifico del uso del suelo, Fuente: propia



Nota. Imagen tomada del Visor Geográfico de la secretaria Distrital de Movilidad, 2024, https://sig.simur.gov.co/Visor_DCV/.

4 ANTECEDENTES

4.1 MARCO TEORICO

La historia de las vías en Colombia se puede referenciar a la necesidad de los pueblos indígenas existentes de transportar sus bestias y materiales para la comercialización e intercambio, teniendo como obstáculo la topografía propia de la región, donde en la actualidad sigue causando problemas. (Eduardo, Eduardo, Lugo, & Guillermo Montoya, 2016) La llegada de los españoles cambia la configuración vial, pasando de una trocha donde transitaban los indígenas y sus animales a un camino real español, por donde no solo transitan las bestias y hombres, sino caballos y carretas, aunque estas fueran solo carreteables hacia el año 1846 cuando en Bogotá se inició el transporte de mercancías, muebles entre otros. Más adelante hacia el año 1905 en la dictadura de Rafael Reyes se crea el Ministerio de Obras Públicas "MOP", el cual incentivó la construcción de vías nacionales, férreas y canalización de ríos. (Bonilla, 2019) Es desde esta época en la que las vías se clasifican en Nacionales, Departamentales y Municipales, de manera directa las cargas que transitaban por las vías aumentaron, buscando así cada vez una vía con buena capacidad de carga y duradera, además del bienestar al transitar.

4.1.1 GESTION DE PAVIMENTOS

La gestión de pavimentos es un campo de estudio y práctica fundamental en la ingeniería de transporte y desempeña un papel crítico en la infraestructura de carreteras y calles en todo el mundo. Refiriéndose a un conjunto de prácticas y estrategias destinadas a evaluar, mantener y mejorar la condición de las superficies de rodadura en carreteras y calles. Según H.M. Westergaard, un pionero en el campo de la ingeniería de pavimentos, en su trabajo publicado en 1926, la gestión de pavimentos tiene como objetivo principal garantizar la seguridad y la comodidad de los usuarios de la vía, así como prolongar la vida útil de la infraestructura vial. La

relevancia de la gestión de pavimentos radica en su impacto directo en la seguridad vial, la economía y la calidad de vida de las personas. En términos de seguridad, pavimentos en mal estado pueden aumentar la probabilidad de accidentes de tráfico debido a la pérdida de control de los vehículos. Además, un pavimento deteriorado puede resultar en costos significativos de mantenimiento para los gobiernos locales y nacionales, así como para los propietarios de vehículos.

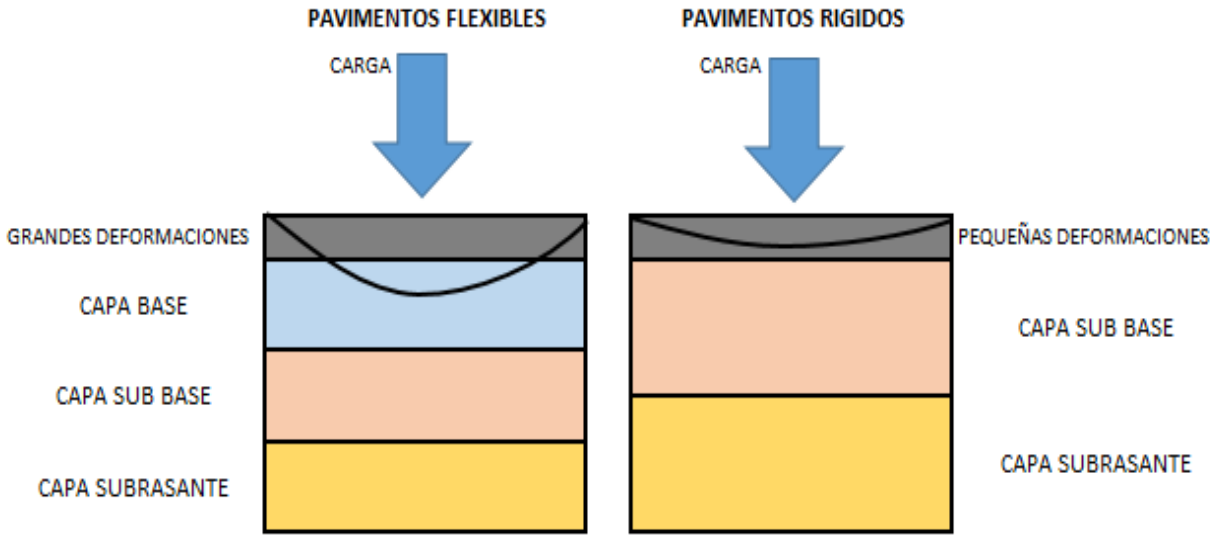
Desde una perspectiva económica, una red de pavimentos en buenas condiciones reduce los costos de operación de vehículos, como el consumo de combustible y el desgaste de neumáticos. Además, mejora la eficiencia del transporte de mercancías, lo que es esencial para la economía de un país. Investigaciones recientes, como el estudio de D. Zhang y sus colaboradores en 2017, han demostrado que la inversión en gestión de pavimentos puede generar un retorno económico significativo a largo plazo. En cuanto a la calidad de vida, pavimentos en buen estado contribuyen a un entorno urbano más agradable. Reducen la incomodidad de los viajes y el ruido generado por el tráfico, lo que mejora la calidad del aire y la salud de los residentes cercanos a las vías.

4.1.2 PAVIMENTO

Actualmente conocemos como pavimento a la estructura vial capaz de soportar cargas, dar estabilidad, seguridad y comodidad al usuario que la transite, esta estructura está constituida por varias capas granulares horizontales con espesores variables, con el fin de transferir las cargas al terreno natural y soportar las mismas. Los materiales más comunes utilizados en estas estructuras como capa de rodamiento son los asfaltos y el concreto, dividiéndose así en pavimentos rígidos y flexibles, como se puede observar en la *figura 9*. Debido a la consistencia de la capa de rodadura en un pavimento rígido las cargas se distribuyen en buena manera evitando así tensiones altas en la sub rasante, por otro lado, en un pavimento flexible, al ser la capa de rodadura más flexible, la subrasante recibe mayores tensiones. (Rebolledo, 2010)

Figura 9

Esquema sobre los tipos de Pavimentos, Fuente: propia



4.1.3 RCD (Residuos de Construcción y Demolición)

Según la resolución "0472 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible", que regula la gestión de residuos RCD. Se pueden utilizar materiales diferentes a las comunes siempre y cuando estas cumplan las especificaciones indicadas en la norma INVIAS de Colombia o las respectivas en otros lugares del mundo. En la actualidad se logra obtener información de una considerable cantidad de materiales alternativos a los materiales convencionales, la extracción masiva de materiales en fuentes no renovables genera grandes impactos medioambientales, además de contaminación. Estos materiales alternativos buscan desde una perspectiva sostenible y tecnológica reducir impactos negativos y encontrar un equilibrio entre avance y ambiente. Los desechos de construcción y demolición, o "RCD", que se producen durante el desarrollo de un proyecto de construcción, son una forma de obtener materiales de baratos, reciclados y de buena calidad, a continuación, se puede observar la clasificación que realizo la secretaria distrital de ambiente de Bogotá, ver *tabla 1*.

Tabla 1 Clasificación RCD Fuente: Decreto 838 de 2005 y Decreto 4741 de 2005. Secretaría Distrital de Ambiente

Tipo	Materiales	Residuos	Fuentes
RCD Aprovechables	I. Residuos comunes inertes mezclados	Residuos pétreos	Concretos, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmentos de roca, baldosín, mortero y materiales inertes que no sobrepasen tamiz #200
	II. Residuos comunes inertes de material fino	Residuos finos no expansivos Residuos finos expansivos	Arcillas, limos y residuos inertes, poco o no plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz #200 Arcillas y lodos inertes con gran cantidad de finos altamente expansivos que sobrepasen el tamiz #200 plásticos
	III. Residuos comunes no inertes	Residuos no pétreos	Plásticos, PVC, maderas, cartones, papel, siliconas, vidrios, cauchos
	IV. Residuos metálicos	Residuos de carácter metálico	Acero, hierro, cobre, aluminio, estaño y zinc

RCD No aprovechables	V. Residuos orgánicos	Residuos de pendones Residuos de cespedones	Residuos de tierra negra Residuos vegetales y otras especies bióticas
	VI. Residuos contaminantes	Residuos peligrosos	Desechos de productos químicos, emulsiones, alquitrán, pinturas, disolventes orgánicos, aceites, asfaltos, resinas, tintas, betunes, plomo, desechos explosivos, barnices, tejas de asbesto, entre otros elementos peligrosos
		Residuos especiales	Polietileno icopor, drywall, lodos residuales de compuestos

4.1.4 PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO (RAP)

En las últimas décadas, el pavimento asfáltico reciclado (RAP) ha ganado popularidad en la construcción y el mantenimiento de carreteras.

Hace referencia a la estructura compuesta por capas asfálticas (asfalto y agregados), la cual luego de un proceso de recuperación por medios mecánicos, se procesa y finalmente se procede a reutilizar, generalmente son materiales obtenidos de estructuras envejecidas o materiales desechados. (Miranda Argüello & Aguiar Moya, 2019) Teniendo en cuenta la gran cantidad de RAP, que se obtiene a diario, y su posible reutilización, representa beneficios medioambientales y económicos.

Según la Federal Highway Administration, hay tres requisitos claves los cuales deben cumplirse para que el RAP tenga éxito, ser rentable, Ser responsable con el medio ambiente y Desempeñarse bien. Así mismo la Federal Highway administration identifico los siguientes objetivos específicos con el fin de que se cumplan estos requisitos

- Fomentar el uso de material reciclado en la construcción de carreteras en la mayor medida económica y práctica posible con un rendimiento igual o mejorado

- Promover el uso de pavimento asfáltico recuperado (RAP) porque la utilización de RAP puede tener el mayor impacto económico, ambiental y de ingeniería en el reciclaje de pavimento. (Federal Highway Administration Research and Technology, 2012)

El uso de RAP en pavimentos presenta una serie de ventajas significativas:

- Sostenibilidad Ambiental: La reutilización de materiales asfálticos reduce la demanda de recursos naturales y disminuye la cantidad de desechos de construcción, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental y la reducción de la huella de carbono.
- Ahorro de Costos: El uso de RAP suele ser más económico que la construcción de pavimentos convencionales, ya que se reducen los costos de transporte y disposición de materiales, así como la necesidad de nuevos materiales.
- Rapidez de Ejecución: Los proyectos que emplean RAP a menudo se completan más rápidamente, ya que la preparación y la colocación de la mezcla reciclada son procesos eficientes.

Sin embargo, también existen desventajas y desafíos asociados con el RAP:

- Variedad en la Calidad del RAP: La calidad del RAP puede variar según la fuente y el proceso de reciclaje, lo que puede afectar la durabilidad y el rendimiento de la mezcla.
- Requerimientos de Evaluación y Control: Es necesario llevar a cabo evaluaciones y controles rigurosos para garantizar que el RAP cumpla con los estándares de calidad y rendimiento requeridos.
- Posible Deterioro Prematuro: Si no se gestiona adecuadamente, el RAP puede conducir a un deterioro prematuro de la superficie de la carretera.

4.1.5 UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO VIAL (UAERMV)

Según el artículo 95 del Acuerdo Distrital 761 de 2020, se estableció como una Unidad Administrativa Especial del Sector Descentralizado en el orden distrital y tiene como objetivo: "Programar y ejecutar las obras necesarias para garantizar la rehabilitación y mantenimiento periódico de la malla vial local, intermedia y rural; así como la atención inmediata a las necesidades de los usuarios" (Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UMV), 2024)

En la ciudad de Bogotá existe un acopio con más de 30.000 m3 de RAP resultante del fresado de las capas asfálticas según las actividades propias de la UMV, este acopio se ubicó en la planta de producción "La Esmeralda" ubicada en el Km 3 vía a pesquilla, como se puede observar en la *figura 10*, desde la aprobación de la resolución N° 365 del 23 de agosto de 2018, la Unidad asumió el compromiso de suministrar este material a las entidades gubernamentales interesadas, con el fin de que puedan utilizarlo en el futuro.. (Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UMV), 2024)

Figura 10

Acopio asfalto fresado y demolición, sede producción La Esmeralda, Fuente: propia



En Bogotá, el reciclaje de pavimentos asfálticos es una práctica clave en la gestión sostenible de la infraestructura vial.

El reciclaje de pavimentos asfálticos es un método que tiene como objetivo optimizar la vida útil de las carreteras, reducir los costos y reducir el impacto ambiental. La UMV de Bogotá ha utilizado diferentes métodos para reciclar los pavimentos, incluyendo:

- Fresado y reposición: Este método implica la remoción de una capa superficial del pavimento dañado, seguida de la reposición con una mezcla asfáltica fresca. La UMV ha empleado esta técnica para restaurar secciones críticas de sus carreteras.
- Reciclaje en frío: El proceso implica la trituración del pavimento actual y su mezcla en frío con nuevos materiales asfálticos. La UMV ha utilizado esta técnica en proyectos de mantenimiento de bajo presupuesto.
- Reciclaje en caliente: En este caso, el pavimento existente se calienta y mezcla con nuevos agregados y ligantes asfálticos. La UMV ha aplicado esta técnica en proyectos de rehabilitación de carreteras con daños estructurales

4.1.6 FUENTES DE RAP UTILIZADAS EN LA CIUDAD:

El Reciclado de Pavimentos Asfálticos (RAP) es esencial para el éxito de cualquier programa de reciclaje de pavimentos. En Bogotá, la UMV ha dependido en gran medida de fuentes locales para obtener RAP. Estas fuentes incluyen:

Pavimentos de demolición: El RAP se obtiene de la demolición de carreteras y calles en desuso. La UMV ha colaborado con las autoridades municipales para recoger estos materiales de demolición.

Fresado de pavimentos: El fresado de carreteras durante proyectos de mantenimiento y rehabilitación proporciona una fuente continua de RAP para la UMV.

4.1.7 PARÁMETROS DE CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO PARA VÍAS CONSTRUIDAS CON RAP

La red de vías terciarias en Colombia constituye un elemento crucial para la conectividad rural y el desarrollo regional. Según el informe del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), se estima que la extensión total de las vías terciarias en el país abarca miles de kilómetros, desempeñando un papel esencial en la integración de comunidades alejadas y en la facilitación del acceso a zonas de difícil alcance (INVÍAS, 2021). Estas carreteras secundarias, aunque de menor jerarquía que las principales, desempeñan un papel vital en la movilidad de personas y mercancías en áreas rurales, contribuyendo significativamente al desarrollo socioeconómico.

En cuanto a la composición geológica de las vías terciarias, esta varía considerablemente a lo largo del territorio colombiano. Investigaciones geotécnicas realizadas por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) indican que, en regiones montañosas, es común encontrar caminos con pendientes pronunciadas y terrenos rocosos, lo que presenta desafíos particulares para la estabilidad y mantenimiento de estas vías (DNP, 2019). Por otro lado, en áreas más planas, la presencia de suelos arcillosos o arenosos puede influir en la calidad estructural de las vías terciarias. Es fundamental considerar estas variaciones geológicas al planificar intervenciones y mejoras en la infraestructura vial para garantizar su durabilidad y eficacia a largo plazo.

4.1.7.1 CALZADA EXISTENTE Y AFIRMADO:

Los materiales en el terreno que no cumplan con los requisitos de calidad establecidos deben escarificarse y reemplazarse por materiales que cumplan con los siguientes criterios, *ver figura 11*:

Figura 11

Criterios a cumplir del material utilizado como afirmado

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito
Dureza (O)		
Desgaste en la máquina de Los Ángeles a quinientas (500) revoluciones (Granulometría A), máximo (%): - NT1 - NT2 - NT3	E-218	 50 30 30
Durabilidad (O)		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota): - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	 12 18
Limpieza (F)		
Límite líquido, máximo (%).	E-125	35
Índice de Plasticidad (%).	E-125 y E-126	4 – 9
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznables, máximo (%).	E-211	2
Contracción lineal.	E-127/E-129	Tabla 311 — 3
Resistencia del material (F)		
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 311.5.2.2.2); el CBR se debe medir sobre muestras sometidas previamente a cuatro días (4 d) de inmersión.	E-148	≥ 15

Nota. Adaptada de *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, Instituto Nacional de Vias (INVIAS), 2022*

4.1.7.2 SUBBASE

Considerando la calidad de los agregados, se definen tres clases de subbase granular (clases A, B y C). Si el documento del proyecto no especifica el material a utilizar, se puede usar la *tabla 2* como referencia:

Tabla 2 clasificación según las clases de subbase granular

CLASE DE SUBBASE GRANULAR	*NIVEL DE TRANSITO*
CLASE A	NT3
CLASE B	NT2
CLASE C	NT1

Nota. Adaptada de *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, Instituto Nacional de Vias (INVIAS), 2022*

Las siguientes especificaciones de calidad deben cumplirse, ver *figura 12*:

Figura 12

Criterios a cumplir del material utilizado como subbase granular

Característica	Norma de ensayo INV	Subbase granular		
		Clase A	Clase B	Clase C
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Granulometría A), máximo (%): - 500 revoluciones	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%).	E-238	30	35	-
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota): - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%).	E-125	25	25	25
Índice de Plasticidad, máximo (%).	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%).	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznables, máximo (%).	E-211	2	2	2
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días (4 d) de inmersión, mínimo.	E-148	40	30	30

Nota. Adaptada de *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, Instituto Nacional de Vias (INVIAS), 2022*

4.1.7.3 BASE

Considerando la calidad de los agregados, se definen tres clases de base granular (clases A, B y C). Si el documento del proyecto no especifica qué material usar, se puede usar la *tabla 3* como referencia:

Tabla 3 Clasificación según las clases de base granular

CLASE DE BASE GRANULAR	*NIVEL DE TRANSITO*
CLASE A	NT3
CLASE B	NT2
CLASE C	NT1

Nota. Adaptada de *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, Instituto Nacional de Vias (INVIAS), 2022*

El uso de materiales reciclados en la construcción de carreteras, especialmente el asfalto de

pavimento reciclado (RAP), es un área de interés creciente en ingeniería de pavimentos. La evaluación integral de la información acerca de las carreteras construidas con RAP demanda una revisión tanto de los resultados de ensayos de laboratorio, como de los diseños de pavimentos asociados a ellos.

4.1.7.4 MATERIAL FRESADO Y/O MATERIAL SOBRANTE

Las siguientes especificaciones de calidad deben cumplirse, ver *figura 13 según el INVIAS*:

Figura 13

Criterios a cumplir del material utilizado como mezcla para reciclado del pavimento existente

Característica	Norma de ensayo INV	Nivel de tránsito		
		NT-1	NT-2	NT-3
Dureza, agregado grueso (O)				
Desgaste en la máquina de Los Ángeles, máximo (%). (Nota).	E-218	40	40	40
Degradación en el equipo Micro-Deval, máximo (%).	E-238	-	30	25
Resistencia mecánica por el método del 10 % de finos: - Valor en seco, mínimo (kN) - Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E-224	 - -	 - -	 70 75
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, máximo (%): - Agregado grueso - Agregado fino	E-220	 18 18	 18 18	 18 18
Limpieza, gradación combinada (F)				
Índice de Plasticidad, máximo (%).	E-125 y E-126	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%).	E-133	30	30	30
Valor de azul de metileno, máximo.	E-235	10	10	10
Terrones de arcilla y partículas deleznables, máximo (%).	E-211	2	2	2
Geometría de las partículas, agregado grueso (F)				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%).	E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%): una cara/dos caras.	E-227	50/-	50/-	50/-
Geometría de las partículas, agregado fino (F)				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%).	E-239	-	35	35
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca en el artículo 330, Base granular, medido en una muestra sometida a cuatro días (4 d) de inmersión, mínimo.	E-148	80	80	100
Adhesividad, gradación combinada				
Resistencia conservada inmersión-compresión, mínimo (%).	E-622	50	50	50

Nota. Adaptada de *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, Instituto Nacional de Vias (INVIAS), 2022*

Figura 14

Granulometría de los agregados reciclados in situ para el uso como capa asfáltica

Material	Tamiz (mm / U.S. *Standard*)							
	37,5	25,0	19,0	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	1 ½ Pulgadas	1 Pulgada	3/4 Pulgada	3/8 Pulgada	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
	Pasa tamiz (%)							
Agregado pétreo de reciclaje, ajustado con material de adición cuando se requiera	100	75 — 100	65 — 100	45 — 75	30 — 60	20 — 45	10 — 30	5 — 20

Nota. Adaptada de *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, Instituto Nacional de Vias (INVIAS), 2022*

Se debe aclarar que si se debe adicionar materiales pétreos estos deben ser de las mismas características mineralógicas esto para evitar posibles diferencias de adhesividad con el ligante, y estos materiales pétreos deben cumplir con los requisitos expuestos en la figura 14

4.1.7.5 CEMENTO ASFALTICO

Los niveles de penetración del cemento asfáltico se expresan en décimas de milímetro, es decir, en intervalos de 0,1 mm. El suministro del material debe satisfacer los estándares de calidad especificados en la figura 15 y cumplir con las características de la mezcla y del proyecto, con un grado de penetración de 40-50, 60-70 u 80-100.

Si las mezclas recicladas, tanto en caliente como en frío, necesitan un tipo diferente de cemento asfáltico en términos de penetración, entonces el suministro debe cumplir con la especificación particular correspondiente. (Instituto Nacional de Vias (INVIAS), 2022)

A continuación, se puede observar las especificaciones del cemento asfaltico según el INVIAS, ver *figura 15*.

Figura 15

Especificaciones del cemento asfáltico Fuente: (INVIAS)

Característica	Norma de ensayo	Grado de penetración					
		40 – 50		60 – 70		80 – 100	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Asfalto original							
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s) (0,1 mm)	INV E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento (°C)	INV E-712	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	INV E-724	- 1,2	+ 0,6	- 1,2	+ 0,6	- 1,2	+ 0,6
Viscosidad a 60 °C (Pa·s) (P)	INV E-716 o INV E-717 o NTC 5117:2017	200 (2 000)	-	150 (1 500)	-	100 (1 000)	-
Viscosidad a 135 °C (Pa·s) (P)		0,5 (5,0)	-	0,4 (4,0)	-	0,3 (3,0)	-
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min) (cm)	INV E-702	80	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno (%)	INV E-713	99	-	99	-	99	-
Contenido de agua (%)	INV E-704	-	0,2	-	0,2	-	0,2
Contenido de parafinas (%)	INV E-718	-	3	-	3	-	3
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland (°C)	INV E-709	240	-	230	-	230	-
Del asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, según la norma de ensayo INV E-720							
Cambio de masa por calentamiento (%)	INV E-720	-	0,8	-	0,8	-	1,0
Penetración retenida a 25 °C, en porcentaje (%) de la penetración del asfalto original	INV E-706	55	-	50	-	46	-
Incremento en el punto de ablandamiento (°C)	INV E-712	-	8	-	9	-	9
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60 °C) del asfalto residual y el asfalto original	INV E-716 o INV E-717 o NTC 5117:2017	-	4	-	4	-	4

Nota. Adaptada de *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, Instituto Nacional de Vias (INVIAS), 2022*

4.1.7.6 EMULSIÓN ASFÁLTICA CATIÓNICA

La clasificación del tipo de emulsión asfáltica se realiza mediante un código alfanumérico, que se organiza según la polaridad del emulgente, el tipo de ruptura, el porcentaje de asfalto residual y el tipo de estabilidad requerida. Este código se estructura de la siguiente manera: C para polaridad catiónica; RR, RM o RL para ruptura rápida, media o lenta respectivamente;

seguido de un guion; 40, 57, 60 o 65, dependiendo del porcentaje de asfalto en la emulsión; y con la letra h indicando una emulsión de ruptura lenta en casos de alta estabilidad.

Los requisitos de calidad establecidos en la *figura 16* deben cumplirse con las emulsiones asfálticas.

Figura 16

Especificaciones emulsión asfáltica Fuente: (INVIAS)

Ensayos sobre la emulsión	Norma de ensayo	Tipo de rotura (Nota)											
		Rápida				Media		Lenta					
		CRR-60		CRR-65		CRM-65		CRL-40		CRL-57		CRL-57h	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Destilación: - Contenido de asfalto residual (%) - Contenido de aceite (%)	INV E-762	60 -	- 3	65 -	- 3	65 -	- 12	40 10	- 20	57 -	- -	57 -	- -
Contenido de agua (%)	INV E-761	-	40	-	35	-	35	-	50	-	43	-	43
Viscosidad: - Saybolt-Furol a 25 °C (s) - Saybolt-Furol a 50 °C (s)	INV E-763	20 -	100 -	- 100	- 400	- 50	- 450	- -	50 -	20 -	200 -	20 -	100 -
Estabilidad durante el almacenamiento: - Sedimentación a 24 h (%) - Sedimentación a los 5 días (%)	INV E-764	- -	1 5	- -	1 5	- -	1 5	- -	- 10	- -	1 5	- -	1 5
Tamizado Retenido tamiz de 0,850 mm (nro. 20) (%)	INV E-765	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1
Demulsibilidad (%)	INV E-766	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rotura en ensayo de mezcla con cemento (%)	INV E-770	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0
Carga eléctrica de la partícula	INV E-767	Positiva		Positiva		Positiva		Positiva		Positiva		Positiva	
pH	INV E-768	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5
Índice de rotura	UNE-EN 13075-1	Reportar											

Nota. Adaptada de *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, Instituto Nacional de Vias (INVIAS), 2022*

4.1.8 PATOLOGIAS PAVIMENTO FLEXIBLE

De acuerdo al manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, (Convenio interadministrativo (INVIAS- Universidad Nacional), 2006). A continuación, se presenta una recopilación bibliográfica de las diversas patologías que se han encontrado en el proceso de investigación:

4.1.8.1 PIEL DE COCODRILO

Los patrones irregulares de fisuras interconectadas en la piel de cocodrilo suelen encontrarse en áreas sujetas a repeticiones de carga. Estas fisuras suelen comenzar en las capas más profundas del pavimento, donde hay mayores esfuerzos de tracción debido a las cargas. Al principio, las grietas se extienden superficialmente como una o más grietas con el sentido de la vía. Estas fisuras forman piezas que dan al pavimento un aspecto similar a la piel de cocodrilo. Estas piezas suelen tener menos de 30 cm de diámetro en promedio, ver *figura 17*.

La piel de cocodrilo generalmente se encuentra en áreas expuestas a cargas de tránsito, pero también puede ocurrir en lugares donde se han producido deformaciones en el pavimento que no están relacionadas con fallas estructurales, por ejemplo; problemas de drenaje que afectan a los materiales granulares, falta de compactación en las capas, reparaciones inadecuadas y suelos expansivos. (Convenio interadministrativo (INVIAS- Universidad Nacional), 2006)

Figura 17

Pavimento con piel de cocodrilo



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

La falla por fatiga de la estructura o de la carpeta asfaltica es la causa mas comun debido a:

- Un espesor de estructura inadecuado.
- Las deformidades en la subrasante

- La mezcla asfáltica se vuelve más rígida en áreas con carga debido a la oxidación del asfalto o al envejecimiento.
- Problemas con el drenaje en materiales granulares.
- Una compactación inadecuada de las capas granulares o asfálticas.
- La producción de mezclas asfálticas puede presentar deficiencias como un exceso de mortero en la mezcla, el uso de asfalto de alta penetración que hace que la mezcla sea deformable o una falta de asfalto en la mezcla que reduce el módulo.
- Reparaciones mal hechas, fallas en la compactación, juntas mal hechas y reparaciones que no reparan el daño

Clasificaciones según la severidad de la patología:

- Baja: Conjunto de fisuras longitudinales paralelas sin desportillamiento, con pocas o ninguna conexión entre ellas y sin evidencia de bombeo, que pueden tener aberturas de hasta 3 mm en la huella.
- Media: Un patrón de polígonos pequeños y angulosos se ha formado en las fisuras, con desgaste ligero en los bordes y aberturas entre 1 mm y 3 mm, sin evidencia de bombeo.
- Alta: Las fisuras han evolucionado (abertura mayor que 3 mm), hay desgaste o desportillamiento en los bordes y los bloques se encuentran sueltos o se mueven al pasar, incluso llegando a presentar descascaramientos y bombeo.

4.1.8.2 FISURAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES

Se refieren a interrupciones en la carpeta asfáltica, ya sea en la misma dirección del paso o transversales a él, son señales de que los esfuerzos de tensión en una capa de la estructura han superado la resistencia del material afectado. Las fisuras en el carril pueden indicar la causa que

las causó porque las que se encuentran en áreas sujetas a carga pueden estar relacionadas con problemas de fatiga general de la estructura o de alguna de sus partes. (Convenio interadministrativo (INVIAS- Universidad Nacional), 2006), *Ver figura 18*.

Figura 18

Fisuras longitudinales y transversal



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Las causas de ambos tipos de fisuras son las siguientes:

- la mezcla asfáltica se rigidiza debido a la pérdida de flexibilidad debido a un exceso de relleno (1) o el envejecimiento del asfalto, que ocurre a bajas temperaturas o gradientes térmicos altos (generalmente superiores a 30°).
- La reflexión de grietas en las capas inferiores de materiales estabilizados, así como grietas o juntas existentes en las placas de concreto hidráulico subyacentes.
- La conformación de fisuras longitudinales también puede ser causada por la fatiga de la estructura se puede observar en las huellas de tránsito.
- La diferencia de rigidez en los materiales encontrados como subrasante.
- Riego de liga deficiente o completamente ausente
- La capa de rodadura no tiene el espesor adecuado.

Clasificaciones según la severidad de la patología:

- Baja: Una fisura con una abertura cerrada o sello en buen estado que es menor que 1 mm.
- Media: Si una fisura se abre entre 1 mm y 3 mm, puede haber desportillamientos leves y fisuras con patrones irregulares de severidad baja en los bordes o cerca de ellos. Es muy probable que el agua entre a través de ellos.
- Alta: Si la abertura de una fisura supera los 3 mm, puede haber desportillamientos significativos y fisuras con patrones irregulares de severidad media o alta en los bordes o cerca de ellos, lo que puede causar movimientos bruscos a los vehículos.

La piel de cocodrilo puede romperse, descascararse, tener asentamientos longitudinales o transversales (por el agua) y fisuras en bloque.

4.1.8.3 FISURA MEDIA LUNA

Las fisuras son de forma parabólica y están relacionadas con el movimiento de la banca, por lo que suelen aparecer junto con hundimientos. Ver *figura 19*.

Figura 19

Pavimento con fisura media luna



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Las causas de este tipo de fisuras suelen ser la inestabilidad de la banca o los efectos de la desecación local, aunque se pueden citar otras causas como las siguientes:

En áreas de terraplén, el talud falla lateralmente.

- La falta de taludes en áreas de corte a media ladera
- La banca no tiene medidas de contención.
- Desecación causada por la presencia de árboles cerca del borde de la carretera.
- Los rellenos que acompañan las obras de contención se consolidan.

La evolución potencial incluye una expansión de la zona afectada, un aumento en el hundimiento y la pérdida de estabilidad.

4.1.8.4 AGRIETAMIENTO EN BLOQUE

Este tipo de deterioro provoca la división de la superficie del asfalto en bloques de forma casi rectangular, con un lado promedio que supera los 0,30 metros.

Esta patología se diferencia de la piel de cocodrilo en cuanto los bloques suelen aparecer en áreas no cargadas, mientras que la piel de cocodrilo solo aparece en áreas sometidas a carga. Sin embargo, las fisuras en bloque evolucionan en piel de cocodrilo como resultado del tránsito es común. La piel de cocodrilo, por otro lado, generalmente se conforma por bloques con más lados y ángulos agudos. Ver *figura 20*.

Figura 20

Pavimento con agrietamiento en bloque



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Las causas de la Fisuración en bloques incluyen la contracción del concreto asfáltico como resultado de las variaciones de temperatura durante el día, lo que provoca ciclos de esfuerzo-deformación en la mezcla. Este tipo de fisuras indican que el asfalto se ha endurecido mucho. Esto puede ser el resultado del uso de un asfalto deficiente para las condiciones climáticas de la región. (Convenio interadministrativo (INVIAS- Universidad Nacional), 2006)

- Reflejo de grietas en materiales de base estabilizados.
- Para combinar el cambio volumétrico del agregado fino en la mezcla asfáltica, use asfalto de baja penetración.

Clasificaciones según la severidad de la patología:

- Baja: Empieza a formarse los bloques con fisuras de abertura menor a 1 mm, no se presentan desportillamientos
- Media: Bloques que tienen fisuras de abertura entre 1 mm y 3 mm o se evidencie sello fallado, así como bordes desportillados o sin sello.
- Alta: Bloques formados con fisuras de abertura que superen 3 mm y con alto desportillamiento en los bordes.

4.1.8.5 FISURACIÓN INCIPIENTE

La fisuración incipiente es el resultado de una serie de fisuras contiguas y cerradas que rara vez se interceptan. Suelen afectar superficialmente el concreto asfáltico. No tienen niveles de severidad asociados debido a que son daños muy leves. (Convenio interadministrativo (INVIAS-Universidad Nacional), 2006), Ver *figura 21*.

Figura 21

Pavimento con Fisuración incipiente



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

- Las causas incluyen una temperatura ambiente baja cuando se coloca la mezcla y el medio ambiente.
- Otra causa puede ser cuando la lluvia cae mientras se coloca el concreto asfáltico.

4.1.8.6 GRIETA DE BORDE

Se observan fisuras con una inclinación a ser longitudinales o semicirculares, localizadas en las proximidades del borde de la carretera, generalmente originadas por la ausencia de berma o por la disparidad de altura entre la calzada y la berma. Por lo general, se encuentran cerca y paralela al borde, y tiene un ancho de hasta 0,6 m2. (Convenio interadministrativo (INVIAS- Universidad Nacional), 2006), Ver *figura 22*.

Figura 22

Pavimento con grietas de borde



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

La ausencia de bordillos, que sirven para delimitar, y la insuficiencia de anchos de berma, o bien, cuando las carpetas asfálticas se extienden hasta el borde del carril y quedan desiguales con la berma, constituyen la principal causa de este deterioro. En estas circunstancias, las fisuras suelen formarse cuando el tráfico circula muy cerca del borde. La mayoría de las fisuras provocadas por este motivo se localizan a una distancia de 0,3 a 0,6 metros del borde de la carretera.

4.1.8.7 PERDIDA DE LAS CAPAS DE LA ESTRUCTURA

Este deterioro se debe a la pérdida de una pequeña área de la capa asfáltica de rodadura, sin que esto implique un impacto en las capas asfálticas subyacentes. Ver *figura 23*.

Figura 23

Pavimento con pérdida de capa de la estructura



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Las causas incluyen una limpieza inadecuada previa a tratamientos superficiales, a continuación, otros motivos

- La capa superficial asfáltica no tiene un espesor adecuado.
- Un riego inadecuado de la liga
- Una mezcla asfáltica que es altamente permeable.

Clasificaciones según la severidad de la patología:

- Bajo: tiene una profundidad inferior a 10 mm.
- Media: Profundidad 10-25 mm.
- Alta: Profundidad superior a 25 mm.

Podría llegar a darse piel de cocodrilo, bache

4.1.8.8 FISURA EN JUNTAS

En este tipo de patología se evidencia fisuras longitudinales o transversales causadas por juntas mal hechas en zonas de ampliación o juntas de construcción de carpeta asfáltica. En la mayoría de los casos, se ubican en el eje de la vía, coincidiendo con el ancho de los carriles, áreas de ensanche y áreas que se unen entre dos pavimentos asfalticos de diferentes edades de aplicación, Ver *figura 24*.

Figura 24

Pavimento con fisura en juntas



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Causas

- Las dilataciones creadas entre los pavimentos de diferente tiempo de aplicación carecen de ligantes.
- El corte vertical de las franjas previamente construidas no se realizó adecuadamente.

- Combinación de materiales con diferentes niveles de rigidez

La pérdida de agregado, los descascaramientos, los asentamientos longitudinales o transversales, la piel de cocodrilo y los desportillamientos son posibles evoluciones.

4.2 MARCO DE REFERENCIA

En la actualidad, Colombia, al igual que en otros países, ha adoptado el uso de asfalto reciclado en la construcción y mantenimiento de carreteras como parte de planes de sostenibilidad y reducción de costos. Es importante señalar que la implementación exitosa del asfalto reciclado requiere una adecuada planificación, diseño y ejecución. Se deben llevar a cabo estudios de calidad para garantizar que el asfalto reciclado cumpla con los estándares de seguridad y durabilidad requeridos. Además, las condiciones climáticas y el tipo de tráfico también deben considerarse al seleccionar el tipo de asfalto reciclado y su ubicación en las carreteras.

4.2.1 ESTUDIOS EN COLOMBIA

- En 2011, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) emitió dos guías: GU-GE-011 para el reciclaje de pavimentos asfálticos in situ estabilizados con aditivos bituminosos y/o hidráulicos y GU-GE-010 para la estabilización del material producto del reciclaje en frío de pavimentos asfálticos. Además de desarrollar una metodología para el estudio de materiales reciclados de capas asfálticas recicladas, esta resolución tiene como objetivo promover el uso del RAP, también conocido como "material bituminoso reciclado".

  Tenemos las siguientes conclusiones a destacar:

1. La cantidad ideal de emulsión se reduce al agregar (1%) uno por ciento de cemento.

Se ha demostrado que las mezclas estabilizadas con cemento tienen un comportamiento técnico y económico mejor que las mezclas estabilizadas solo con emulsión. (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2011)

2. Se confirma que la diferencia en la granulometría de los dos materiales de carpeta asfáltica triturada no afecta los resultados finales, según los resultados de los porcentajes óptimos obtenidos de las mezclas. En el año 2011, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) publicó.

- En 2012, el INVIAS publicó la norma INV E-812-13, que especifica cómo calcular la cantidad y el nivel de material reciclado en mezclas de concreto asfáltico hechas en caliente con material reciclado.
- En (Rojas, 2020) realizaron una evaluación del comportamiento de mezclas elaboradas con RAP, proveniente de UMV y el IDU, desarrollando una comparación entre una capa de rodadura de MDF-20 con el 100% de RAP y una capa de rodadura convencional MD-12

  Se llegó a una conclusión importante: las mejores combinaciones resultaron en RAP de 68 a 69 por ciento, agregado mineral de 20 por ciento, cemento asfáltico de 3,5 por ciento, cemento hidráulico de 1 a 1,5 por ciento y un porcentaje promedio de cemento asfáltico reciclado de 2,5 por ciento. El manejo de humedades y el proceso de curado fueron ajustados en la obra.
- En (Mora, 2020) realizó un diseño para mejorar la resistencia a la humedad del RAP utilizado como capa de rodadura, se desarrolló un diseño de mezcla en caliente de cal hidratada. Se descubrió que la cal hidratada disminuye el índice de envejecimiento del pavimento de asfalto, lo que retrasa la oxidación de muchos tipos de betún. Esto se

debe a la reacción de la cal con las moléculas altamente polares del betún, lo que retrasa el índice de cambio de la química del betún. Para lograr los efectos, generalmente se utiliza un 1,5% de cal en relación al peso del agregado en seco.

4.2.2 UMV (Unidad de mantenimiento Vial)

La Unidad de Mantenimiento Vial (UMV) ha realizado estudios específicos sobre el mantenimiento y rehabilitación de la malla vial de Bogotá con materiales como el RAP. Estos son algunos de los estudios realizados:

- Durante el 2018 se realiza un segmento de vía como prueba, se llevándose a cabo un parcheo utilizando RAP en su totalidad, localizado en la localidad de Teusaquillo, barrio la Esmeralda de Bogotá.

  Como conclusiones relevantes, se hace la recomendación del uso de equipos de parcheo móviles y se fomenta el uso de materiales RAP. Es necesario realizar la verificación en cuanto a costo/beneficio comparando este método con otras técnicas que se asemejen. Se recomienda la utilización de equipos de mayor rendimiento, teniendo en cuenta el impacto ambiental y visual. (Enciso & Martinez, 2021)
- En 2018, la Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UAERMV) y la Universidad Militar Nueva Granada realizaron una colaboración para investigar la respuesta mecánica y dinámica de las mezclas asfálticas hechas de pavimento reciclado (RAP).

  Se diseñaron 64 mezclas del tipo MDF20 variando los contenidos de RAP, además incluyeron aditivos como cemento, emulsiones y rejuvenecedor, en el proceso de desarrollo del acuerdo. Finalmente, estas mezclas se compararon con una mezcla patrón MD-20.

((UMV), Unidad administrativa de rehabilitacion y mantenimiento vial, 2018)

- La UMV desarrolló un proyecto en 2019 que consistía en analizar el desempeño como capa de rodadura para dos estructuras de pavimento: la primera consistían en una mezcla MD-12 y otra con una mezcla MDF-20. El proyecto se desarrollo en su totalidad con RAP, cemento portland al 2% y una emulsión asfáltica tipo CRL-1. En la planta de producción La Esmeralda de la UAERMV, se construyeron dos estructuras, cada una con una longitud de 10 m. (Martinez, 2019)
- En 2020, UAERMV y Universidad de La Salle desarrollaron un proyecto investigación el cual consistió en la instalación de varios tipos de sensores electrónicos en dos estructuras de pavimento flexible; el primero estaba hecho de materiales convencionales, mientras que el segundo estaba hecho de una mezcla asfáltica en frío con RAP y otros materiales RCD.

  Se buscaba evaluar el comportamiento de la estructura de pavimento hecha con materiales reciclados y así analizar su viabilidad en vías locales, se propone implementar una línea de deterioro en el tiempo a mediano y largo plazo a través de visitas técnicas de seguimiento. Con la captura de señales también se espera que revelen el comportamiento a lo largo del tiempo de este tipo de materiales. (Enciso & Martinez, 2021)

4.2.3 ESTUDIOS EN EEUU

El Método Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) fue desarrollado en la década de 1990 como parte del programa Strategic Highway Research Program (SHRP) en los Estados Unidos. Este enfoque revolucionario en ingeniería de pavimentos se concibió para abordar las

limitaciones de los métodos de diseño de mezclas asfálticas existentes, con énfasis en la adaptación a las condiciones climáticas y de tráfico específicas de cada ubicación. La metodología Superpave incorpora una serie de avances, desde la determinación de las propiedades reológicas de los asfaltos hasta la inclusión de pruebas de laboratorio más rigurosas, como el ensayo de compactación giratoria y el ensayo de módulo dinámico. La implementación del Método Superpave ha demostrado su eficacia en la mejora de la durabilidad y el rendimiento de las carreteras, estableciéndose como un estándar en la ingeniería de pavimentos. (The Federal Highway Administration (FHWA), 2011)

"Superpave Asphalt Binder Specification" (SHRP).

En el año 2001, la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), publicó un manual como guía de referencia en los diseños de mezclas y pruebas de campo en mezclas Superpave con RAP, detallando el paso a paso para el diseño y pruebas de estas mezclas. En el año 2011 en EEUU la The Federal Highway Administration (FHWA) creo un grupo de trabajo de expertos en RAP (ETG), el cual está formado por expertos de diferentes entidades como lo son la Administration, los departamentos de transporte estatales, la Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO), la Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos (NAPA), el Centro Nacional de Tecnología de Asfalto (NCAT) y personas de la industria. y la academia con el objetivo de incentivar el uso de RAP en mayores cantidades proporcionando información sobre el estado de la práctica para incluir mayores porcentajes de RAP en mezclas asfálticas. (National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 2001)

5 METODOLOGIA

Con el fin de estructurar un plan de trabajo sólido encaminado a lograr los objetivos propuestos, la investigación se realizó a través de visitas en campo y de tipo documental, con la ayuda de la UMV (Unidad de Mantenimiento Vial), para lo cual nos acercamos a la planta de producción La Esmeralda, conociendo así el proceso de recuperación y la reutilización de estos en las vías a estudiar. El plan de análisis se complementó por dos frentes, una lectura lineal la cual exigió la revisión consecutiva de la información que se obtenga en las fuentes bibliográficas, por otro lado, un análisis de la información obtenida a partir de las visitas a campo, identificando así repeticiones, confirmaciones, vacíos, falencias, así como identificar y centralizar la información sobre el objeto de investigación.

A continuación, se presenta el diagrama (*figura 25*) y su respectiva descripción de las categorías escogidas para la investigación:

Figura 25

Diagrama del proceso metodológico, Fuente propia



- Revisión de marco de referencia:

- Identificar y revisar estudios previos relacionados con el análisis visual de vías construidas con RAP.
- Analizar metodologías utilizadas en proyectos similares.

- Identificar herramientas y técnicas empleadas para evaluar visualmente el estado de las vías.

➢ Revisión de marco teórico:

- Fundamentar teóricamente la importancia del análisis visual en la evaluación de vías construidas con RAP.
- Revisar conceptos clave relacionados con la evaluación visual de superficies de pavimento.
- Explorar la literatura sobre el uso de RAP en la construcción de vías y su impacto en la durabilidad y el mantenimiento.

➢ Herramientas y métodos de análisis:

- Inspección visual directa.
- Uso de fotografías y/o videos para documentar el estado visual.
- Posible uso de GPS u otras tecnologías para obtener ubicación exacta
- Posible uso de AutoCAD para analizar y visualizar los datos recopilados.

➢ Diseñar el protocolo de análisis:

- Establecer los procedimientos para la recolección de datos en el tramo seleccionado.
- Definir los criterios de evaluación visual específicos para este tramo.
- Determinar la frecuencia y ubicación de las inspecciones en el tramo de interés.

➢ Recopilar y analizar los datos:

- Recolectar datos visuales según el protocolo establecido para el tramo seleccionado.
- Utilizar AutoCAD para analizar y visualizar los datos recopilados de manera efectiva.

➢ Comparación en matriz analítica

- Establecer los criterios específicos que se utilizarán para evaluar y comparar los

pavimentos.

- Diseñar una tabla o matriz que contenga los diferentes tipos de pavimento en filas y los criterios de comparación en columnas.

5.1 DESCRIPCION DE SITIO INSPECCIONADO "VISITAS A CAMPO"

En los días 8 al 10 de septiembre se realizaron visitas a la zona de estudio. La cual consistió inicialmente en la verificación de las condiciones del pavimento y condiciones de tránsito, identificación de las instituciones educativas existentes, sectores residenciales o comerciales, identificación del estado de la malla vial existente, a través del registro fílmico y fotográfico.

En cuanto al tránsito vehicular en esta zona, se pudo apreciar que en su mayor proporción está compuesto por vehículos livianos particulares tipo automóvil, seguido están los camiones livianos tipo C2P y por último motocicletas con una proporción alta.

En el sector no hay presencia de transporte público SITP y provisional. Adicionalmente, se evidencia frecuente flujo de peatones, y bovinos, realizando cruces en las calles del sector. Presencia de circulación de rutas escolares. De acuerdo con las visitas de campo realizadas, se halló que los usuarios vulnerables como peatones y bici usuarios carecen de zonas de circulación adecuadas para su circulación en la vía. Los trayectos que implican cruce de calzadas no cuentan con la señalización y demarcación adecuada para proteger a dichos actores, quedando expuestos a incidentes viales en la zona de estudio (CL 137 entre la KR 2A y la DG 119A sur). Se lograron identificar las siguientes instituciones educativas y demás equipamientos atractivos de peatones y/o ciclistas.

- Colegio rural "El Uval IED" km 8 auto al llano vereda el Uval
- Planta de tratamiento el dorado
- Patio taller Mueve Usme SAS. cl 137 sur #11-11

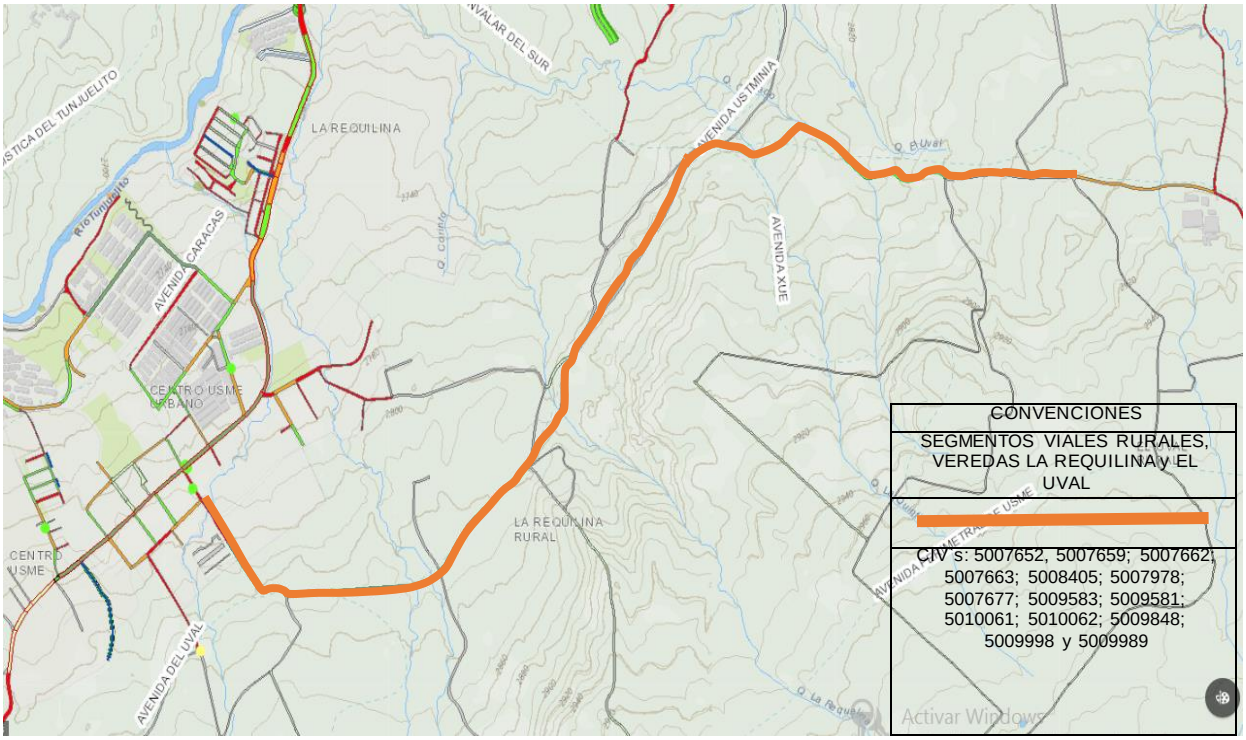
- Salón comunal la Requilina

La descripción de la malla vial se obtiene de acuerdo con las características y condiciones percibidas en la zona de influencia durante la inspección en campo, es decir esta información es de fuente primaria, su clasificación se encuentra en malla vial local y rural de la ciudad.

CL 137 entre la KR 2A y la DG 119A: Actualmente cuenta con dos calzadas de dos carriles, de doble sentido de circulación E-W y W-E, con un ancho de calzadas variable entre 5 m y 7 m. Este tramo hace parte de la malla vial local y rural de la ciudad, distribuyéndose de la siguiente manera, ver *figura 26*:

Figura 26

Localización CIV`s, Fuente propia



Nota. Ortofoto tomada del Visor Geográfico de la secretaria Distrital de Movilidad, 2024, https://sig.simur.gov.co/Visor_DCV/.

Además, se presenta la siguiente tabla con la información relevante de la vía de estudio. Ver *tabla 4*.

Tabla 4 Intervención total de la vía

CONDICIONES ACTUALIZADAS (Terreno)

CIV	PK	EJE VIAL	ABSCISAS		LONG. (m)	ANCHO (m)	ÁREA (m2)	LONG. (km/Carril)
			DESDE	HASTA				
5007652	606501	Calle 137 Sur	k0+000	k0+094	94	5,480	515,120	0,147
5007659	606507	Calle 137 Sur	k0+094	k0+125	31	5,798	179,738	0,051
5007662	606510	Calle 137 Sur	k0+125	k0+154	29	5,876	170,404	0,049
5007663	606513	Calle 137 Sur	k0+154	k0+275	121	6,422	777,062	0,222
5008405	606725		k0+275	k0+355	80	6,286	502,880	0,144
5007978	606543		k0+355	k0+782	427	6,437	2.748,599	0,785
5007677	604431	Carrera 2E	k0+782	k1+142	360	6,700	2.412,000	0,689
5009583	91021819		k1+142	k1+167	25	7,434	185,850	0,053
5009581	91021817		k1+167	k1+429	262	5,751	1.506,762	0,431
5010061	91031273		k1+429	k1+546	117	5,707	667,719	0,191
0	0		k1+546	k2+098	552	5,707	3.150,264	0,900
5010062	91015590		k2+098	k2+802	704	6,011	4.231,744	1,209
5009848	91027565		k2+802	k3+028	226	5,783	1.306,958	0,373
5009998	91028700		k3+028	k3+148	120	6,301	756,120	0,216
5009989	91015593		K3+148	K3+342	194	6,031	1.170,014	0,334
				TOTAL	**3342**	**6**	**20.052**	**5,795**

Nota. Datos suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Dicho abscisado se puede apreciar de forma más precisa en el anexo 10.2 “seguimiento de acuerdo al estado de la vía”, el cual cuenta con una escala y visualización idónea para el tamaño de la vía objeto de estudio.

5.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN CAMPO

La recolección de material de video se ha vuelto esencial para numerosas aplicaciones, desde la creación de contenido multimedia, hasta la cartografía detallada de áreas específicas. En este caso, se focalizó en la recopilación de información en la zona de Usme La Requilina el 8 de septiembre de 2023, utilizando una Cámara GoPro Hero9 y un GPS Emlid.

En colaboración con estudiantes de maestría de la Universidad Distrital y la Unidad de mantenimiento vial, quienes se encontraban desarrollando un prototipo para el procesamiento de imágenes mediante inteligencia artificial, centrado específicamente en la evaluación de pavimentos. El cual implicó la utilización de una Cámara GoPro Hero9 5K CHDHX-901 NTSC/PAL, ver *figura 27*, conocida por su calidad de imagen y capacidad de grabación en alta resolución, la cual fue instalada en el frente de una camioneta mediante un contenedor plástico anclado con copas succionadoras que permitirían una fijación segura y estable de la cámara, la cual estaría sometida a una velocidad constante de 20 km/h.

Para complementar la información visual, se incorporó un receptor GPS Emlid al sistema. Este dispositivo se instaló junto a la cámara en la parte frontal de la camioneta para garantizar una sincronización precisa entre la ubicación geográfica y las imágenes capturadas.

El vehículo equipado con esta configuración recorrió tramos de pavimento a la velocidad establecida, capturando continuamente imágenes y datos de ubicación. La presencia del GPS garantizó la georreferenciación precisa de cada imagen capturada, permitiendo así la creación de un registro georreferenciado cada 4 metros.

Figura 27

Localización Instalación cámara GoPro, Fuente Propia



5.3 MATERIALES Y MÉTODOS

5.3.1 CONFIGURACIONES DEL EQUIPO

Cámara GoPro Hero9 5K CHDHX-901, cuenta con una capacidad de grabación de video de hasta 5K a 30 cuadros por segundo y la capacidad de tomar fotografías de 20 megapíxeles, ofrece imágenes nítidas y detalladas, está equipada con funciones avanzadas como estabilización de video y es resistencia al agua hasta 10 metros. Está cámara se configuró con una resolución de 5K y se activó la función de metadatos para registrar información adicional.

El GPS Emlid Reach RS2 es un receptor de posicionamiento global (GPS) de alta precisión fabricado por la empresa Emlid, el cual proporciona una precisión de posicionamiento en el rango de centímetros, utiliza receptores GNSS de doble frecuencia para recibir señales de múltiples constelaciones, como GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou. Este se configuró para

registrar la posición a intervalos regulares, garantizando la precisión de la información geoespacial.

5.3.2 PROCESO DE CAPTURA DE DATOS:

- Se inició la grabación simultánea en la GoPro Hero9 y la adquisición de datos de posición en el GPS Emlid reach rs2,
- La camioneta se movió a una velocidad constante de 20 km/h.
- Se planificó un recorrido específico por la zona de Usme La Requilina el 9 de septiembre de 2023, centrándose en el área con pavimento construido con RAP. Como se muestra en la *figura 28*.

Figura 28

Localización Recorrido con cámara GoPro



Nota. Fuente: propia, en el recorrido se realiza una toma de fotografías con el apoyo del ingeniero Sergio López Pinzón, estudiante investigador en Grupo de estudios en pavimentos y materiales sostenibles

5.3.3 SINCRONIZACIÓN TEMPORAL:

- Se realizó una verificación de la alineación temporal entre el metraje de la GoPro y los datos de posición del GPS, como se muestra en la *figura 29*.

- Se corrigieron desincronizaciones manuales para asegurar la consistencia temporal.

Figura 29

Localización Calibración cámara GoPro, Fuente: propia



5.3.4 FILTRADO DE DATOS:

- Se implementó un algoritmo de filtrado diseñado para destacar las características específicas del pavimento construido con RAP y el desarrollo de un algoritmo de filtrado para procesar los datos brutos y eliminar posibles inconsistencias.
- Se aplicaron criterios de selección para garantizar la calidad y coherencia de la información georreferenciada.

5.3.5 GENERACIÓN DE REGISTROS GEORREFERENCIADOS:

- Se creó un registro georreferenciado cada 4 metros, asociando coordenadas geoespaciales con segmentos específicos del pavimento reciclado.

6 RESULTADOS

6.1 CICLO DE VIDA

6.1.1 ESTADO INICIAL

Como se evidencia en la figura *30*, la vía de estudio se encontraba en su totalidad sin pavimentar, compuesta por grava, tierra y material granular, con trazados sinuosos, pendientes pronunciadas en algunos puntos, siguiendo la topografía natural del terreno

El afirmado del terreno tiene presencia de deformaciones y baches, además de material granular desprendido, en la época de la visita se evidencia gran cantidad de polvo afectando la visibilidad y calidad de aire. Los sistemas de drenaje son inexistentes en gran parte de la vía, y los existentes son deficientes, lo que genera encharcamientos y erosión en temporada de lluvias, las zanjas existentes se evidencian obstruidas por vegetación.

La señalización es nula tanto vertical como horizontal, además de la falta de iluminación

Figura 30

Estado inicial de la vía de estudio Fuente: Unidad de Mantenimiento Vial (UMV)



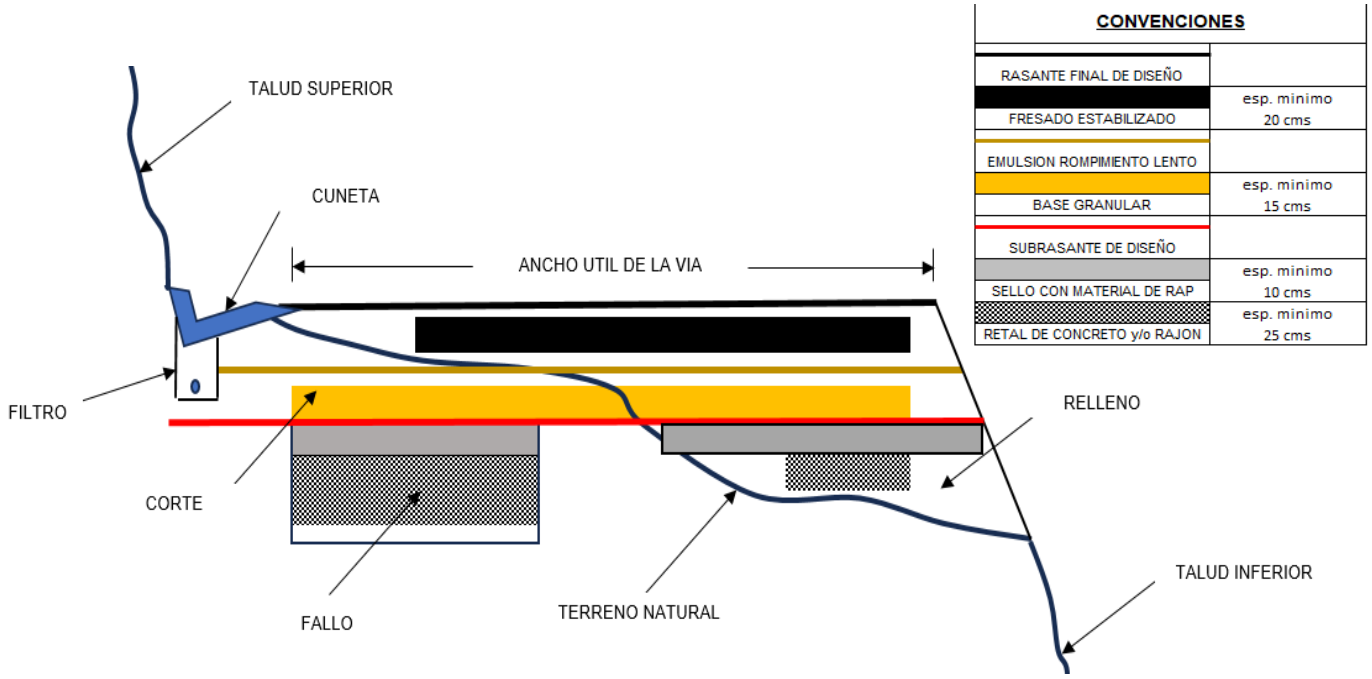
Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Los diseños que desde la UMV se adaptan para las vías terciarias de la ciudad de Bogotá son resultados de estudios citados en la sección 4.2.2, además de la utilización de los diferentes manuales establecidos por el INVIAS y el IDU. Para determinar la capacidad portante del suelo y detectar posibles fallos, se realiza un sondeo en la rasante mediante la técnica de apique. Con esta información se toma decisiones sobre la construcción de obras de drenaje en algunos tramos de la vía, además de los posibles mejoramientos del afirmado.

Siguiendo la guía "DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO Y VÍAS LOCALES PARA BOGOTÁ D.C.", se realiza un cálculo de numero de ejes por conteo y pesaje, luego procediendo a la definición de espesores de las estructuras de pavimento. Estos espesores se realizan bajo la metodología de AASHTO 93, finalmente se presenta un esquema de la estructura típica para una vía con RAP utilizada por la UMV en vías terciarias de la ciudad de Bogotá, ver *figura 31*.

Figura 31

Sección típica transversal de una vía rural con fresado estabilizado Fuente: Unidad de Mantenimiento Vial (UMV)



Nota. Esquema suministrado por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

6.1.2 OBTENCION DE RAP

La mezcla y fabricación del RAP se realizó en sede de producción LA ESMERALDA de la UMV, con los equipos disponibles en esta, se presenta a continuación la manera en que se procedió:

- Fresado y demolición de pavimento

Es evidente que en la planta La Esmeralda se encuentran dos grandes acopios uno es proveniente de pavimento fresado, por el otro lado se evidencia pavimento producto de demolición, este es obtenido de las diferentes obras de la ciudad de Bogotá. Ver figuras 32, 33 y 34.

Figura 32

Fresado de pavimento Fuente: Unidad de Mantenimiento Vial (UMV)



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Demolición de pavimento Fuente: Unidad de Mantenimiento Vial (UMV)



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Figura 34

Transporte y acopio de asfalto fresado y demolición, Fuente Propia



- Se realiza la trituración del RAP, para luego ser clasificado, de acuerdo al artículo 461-07 INVIAS se debe cumplir la especificación granulométrica mostradas en la *figura 35*

Figura 35

Triturado de asfalto en grava hasta ½ y ¾, Fuente: propia



- Se adiciona cemento hidráulico en una cantidad de entre 1% y 2%, en la *figura 36*, se muestra la tolva donde se realiza la mezcla.

Figura 36

Mezcla de asfalto triturado y cemento hidráulico, Fuente: propia



- Posteriormente se realiza la adición de emulsión asfáltica en frio por medio de flautas en las tolvas destinadas para este fin. En la figura 37, se muestra el almacenamiento de la emulsión asfáltica, para luego proceder a su mezclado.

Figura 37

Almacenamiento de emulsión asfáltica



- Finalmente, la mezcla es cargada y dirigida a la zona de construcción, ver *figura 36*.

Figura 38

Cargue y distribución de RAP, Fuente: propia



6.1.3 CONSTRUCCION

Como se puede observar en la *figura 39, 40, 41, y 42*, en campo se procede a realizar las siguientes actividades previas al extendido del RAP proveniente de la planta:

- Localización y Replanteo Topográfico, de acuerdo con los estudios y diseños estipulados por la UMV.
- Perfilación, limpieza del terreno natural, hasta alcanzar la cota de diseño de la subrasante.

Figura 39

Limpieza y nivelación de terreno



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

- Determinación de la capacidad portante del terreno de fundación, mediante apiques y con volqueta cargada para determinar posibles fallos por debajo de la subrasante de diseño. Si se detectan fallos, estos se subsanan con una cama de retal de concreto y/o rajón con sello de material de RAP, para luego proceder a compactar.

Figura 40

Apiques en vía de estudio



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Figura 41

Compactación terrena vía de estudio



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

- En algunos sectores de alta pluviosidad, se detecta el nivel freático muy alto el cual se abatió mediante filtros para captar las aguas percoladas para que no penetren en las capas granulares de la vía rural.

  específicamente se realizó las siguientes intervenciones con filtro francés, ver *tabla 5*:

Tabla 5 intervenciones filtro francés

ABSCISAS		LONG. (m)	MARGEN	
DESDE	HASTA		DERECHA	IZQUIERDA
K1+060	*K1+138*	*78*	*X*	
K1+749	*K1+874*	*120*	*X*	
K1+978	*K2+098*	*120*	*X*	
K2+098	*K2+198*	*100*	*X*	
K2+435	*K2+513*	*78*		*X*
K2+758	*K2+802*	*44*		*X*
K2+802	*K2+925*	*125*		*X*
TOTAL		**665**		

Nota. gráfica suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Figura 42

Instalación filtro francés



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

- No se evidenció extendido de subbase y base, por tal motivo luego de humectar y compactar la subrasante de diseño, como se evidencia en la *figura 43*, se procede a imprimar con emulsión catiónica de rompimiento lento manualmente, cabe resaltar que se debe esperar como mínimo 2 horas a que rompa dicha emulsión y penetre lo mejor posible en la subrasante.

Figura 43

Imprimación en vía de estudio



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

- Como se evidencia en la *figura 44*, después de esta imprimación se procede a extender, humectar y compacta el RAP, hasta alcanzar el ancho de diseño, de acuerdo con el diseño estipulado *figura 31*.

Figura 44

Extendido y compactación de RAP



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

- Finalmente, se evita el tránsito vehicular para prevenir daños prematuros además en lo posible se protege de agentes climáticos como la lluvia

  con el fin de que la emulsión asfáltica termine de romper y la mezcla alcance su máxima resistencia y cohesión.

6.1.4 ANALISIS DE COSTOS

A continuación, se realiza un cálculo de cantidades de obra para el análisis de presupuestos, ver tabla 6.

Tabla 6 cantidades de obra, Fuente: propia

DATOS GENERALES DE LA VIA

Ítem	**Cantidad**	
Longitud vía intervenida	**5.795**	**m**
Ancho promedio	6	m
Capa RAP	0,2	m
Área	35.434	m2
volumen	7.087	m3

Se utilizaron los análisis de precios del INVIAS para cada departamento para calcular los costos económicos de las actividades previstas. Ver *tabla 7 y 8.*

No se consideran las condiciones de drenaje.

6.1.4.1 ALTERNATIVA 1

Instalación de RAP proveniente de la UMV con un porcentaje de emulsión asfáltica del 3,5 % y cemento hidráulico del 1%.

El acarreo de RAP desde los patios de acopio es de 1 km.

La ubicación de la UMV LA ESMERALDA donde es traído el concreto asfaltico es a una distancia promedio de 17 kilómetros

Tabla 7 presupuesto RAP, Fuente: propia

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
230.1	MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE CON ADICION DE MATERIALES	m2	35434	$ 3.435	$ 121.719.935
420.2	RIEGO DE IMPRIMACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA CRL-57	m2	35434	$ 4.637	$ 164.300.296
461.1	PAVIMENTO RECICLADO IN SITU CON EMULSIÓN ASFÁLTICA	m3	7087	$ 110.084	$ 780.142.341
900.2.3	TRANSPORTE DE MATERIALES PARA DISTANCIAS MAYORES DE MIL METROS (1.000 m) MEDIDOS A PARTIR DE CIEN METROS (100 m) (Analizado por precio de mercado para m3 - Km)	m3 - km	120475,011	$ 1.709	$ 205.855.016
	TOTAL COSTOS DIRECTOS				$ 1.272.017.588

6.1.4.1 ALTERNATIVA 2

Instalación de pavimento en caliente MDC-19.

El acarreo de RAP desde los patios de acopio es de 1 km.

La ubicación de la UMV LA ESMERALDA donde es traído el concreto asfaltico es a una distancia promedio de 17 kilómetros.

Tabla 8 presupuesto MDC-19, Fuente: propia

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
230.1	MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE CON ADICION DE MATERIALES	m2	35434	$ 3.435	$ 121.719.935
420.2	RIEGO DE IMPRIMACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA CRL-57	m2	35434	$ 4.637	$ 164.300.296
450.2	MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO MDC-19 (Mezcla in situ)	m3	7087	$ 364.435	$ 2.582.665.406
900.2.3	TRANSPORTE DE MATERIALES PARA DISTANCIAS MAYORES DE MIL METROS (1.000 m) MEDIDOS A PARTIR DE CIEN METROS (100 m) (Analizado por precio de mercado para m3 - Km)	m3 - km	120475,011	$ 1.709	$ 205.855.016
	TOTAL COSTOS DIRECTOS				$ 3.074.540.653

Tabla 9 comparación presupuestos, Fuente: propia

- Costo directo por kilómetro de vía

COMPARACIÓN COSTO POR Km	
PAVIMENTO CON RAP	PAVIMENTO CON MDC-19
$ 219.516.306	$ 530.583.705

6.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

La combinación de la GoPro Hero9 y el GPS Emlid eTrex 32X permitió una recopilación precisa de información cinematográfica del pavimento construido con RAP en la zona de Usme La Requilina el 8 de septiembre de 2023. El proceso de filtrado y generación de registros cada 4 metros facilitó un análisis detallado de las condiciones del pavimento reciclado.

Durante el desarrollo de este procedimiento, se logró filtrar un total de 1046 fotografías. Estas

imágenes fueron cuidadosamente vinculadas mediante un archivo KMZ a un archivo en AutoCAD, estableciendo así una conexión integral entre los datos visuales y el entorno geoespacial. A su vez, este archivo en AutoCAD estaba interconectado con las coordenadas proporcionadas por la Secretaría de Movilidad, específicamente bajo el sistema PCS_CartMAGBOG, esto fue de suma importancia, ya que sus coordenadas proporcionaron un marco de referencia preciso para la ubicación geográfica de cada registro fotográfico. Este enlace directo entre los datos obtenidos y las coordenadas geoespaciales oficiales garantiza una representación fiel y precisa de la información recopilada en el terreno.

Adicionalmente, se utilizó la Ortofoto proporcionada por la Secretaría de Movilidad para complementar y mejorar la precisión en la representación espacial. Esta herramienta visual facilitó la ubicación exacta de cada registro fotográfico en el contexto real del entorno, proporcionando un nivel adicional de detalle y contextualización a la información recabada, ver *figura 45*.

Este enfoque multidisciplinario asegura la confiabilidad y utilidad de los datos para futuros análisis y aplicaciones relacionadas con la infraestructura vial.

Figura 45

Localización sectorizada vía de estudio, Fuente: propia



Nota. Ortofoto tomada del Visor Geográfico de la secretaria Distrital de Movilidad, 2024, https://sig.simur.gov.co/Visor_DCV/.

Como parte de un proceso integral de evaluación, las imágenes fueron clasificadas en función del estado del pavimento, dividiéndolas en categorías de buenas, malas y regulares, estos parámetros se definieron de la siguiente manera:

- **Pavimento bueno**:

Se considera un pavimento como bueno cuando no presenta deformaciones visibles y menos del 10% de la superficie muestra daños incipientes, tales como grietas muy pequeñas o áreas ligeramente deterioradas. En la *figura 46* se puede ver un ejemplo de pavimento bueno.

Figura 46

Pavimento en buen estado vía Usme La Requilina imagen 166 (ver anexo 10.2)



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

- **Pavimento regular**:

Se clasifica como pavimento regular aquel que muestra menos del 30% de la superficie con deformaciones evidentes, como grietas más amplias o áreas con desgaste moderado. Además, menos del 50% de la superficie presenta algún tipo de daño. En la *figura 47* se puede ver un ejemplo de pavimento regular.

Figura 47

Pavimento en regular estado vía Usme La Requilina imagen 190 (ver anexo 10.2)



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

- **Pavimento malo**:

Se identifica como pavimento malo cuando más del 30% de la superficie muestra deformaciones significativas, como grietas extensas, hundimientos, o áreas con deterioro severo. Además, más del 50% de la superficie presenta algún tipo de daño. En la *figura 48* se puede ver un ejemplo de pavimento regular.

Figura 48

Pavimento en malr estado vía Usme La Requilina imagen 66 (ver anexo 10.2)



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

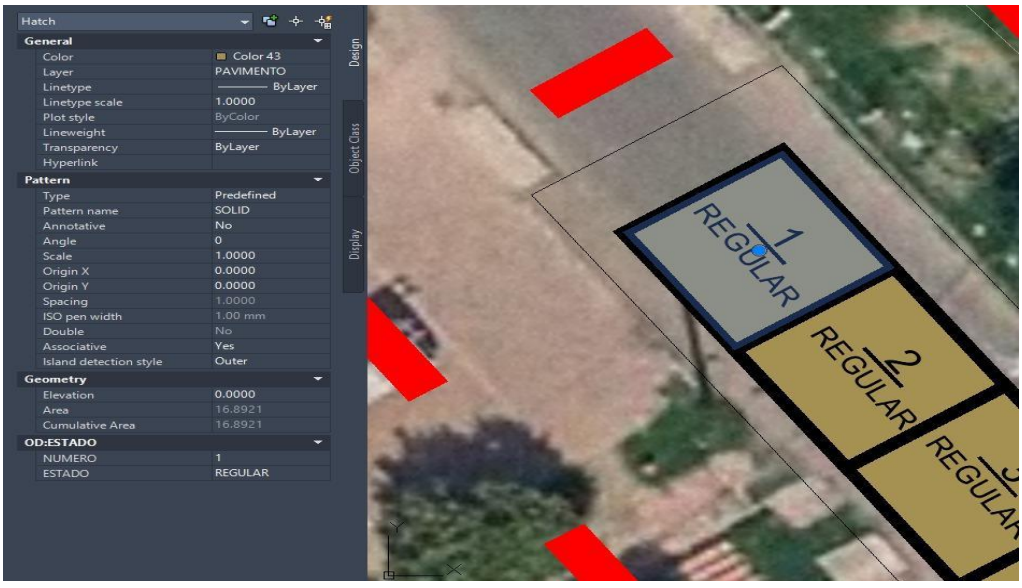
Estas clasificaciones fueron representadas visualmente en AutoCAD mediante convenciones

de color, utilizando el rojo para indicar pavimentos en mal estado, el verde para aquellos en buen estado y el café para pavimentos de calidad regular. Esta representación visual proporciona una rápida y clara evaluación del estado del pavimento en el contexto general del proyecto.

Para fortalecer aún más la consolidación de la información y asegurar su accesibilidad y manipulación en el futuro, se implementó un sistema de vinculación mediante un Object Data en AutoCAD. Este conjunto de datos contiene información clave, como el número de la fotografía y el estado del pavimento asociado a cada punto. Además, se introdujo una tabla de atributos con propiedades similares, posibilitando una visualización, procesamiento y/o modificación eficiente en futuras instancias. Esta estructura simplifica la gestión y actualización de datos de manera ágil y efectiva, con el propósito de lograr un progreso más significativo y eficiente en el futuro, en la *figura 49* se puede observar los datos relacionados a la clasificación.

Figura 49

Sectorización en AUTOCAD vía de estudio



Nota. Ortofoto tomada del Visor Geográfico de la secretaria Distrital de Movilidad, 2024, https://sig.simur.gov.co/Visor_DCV/.

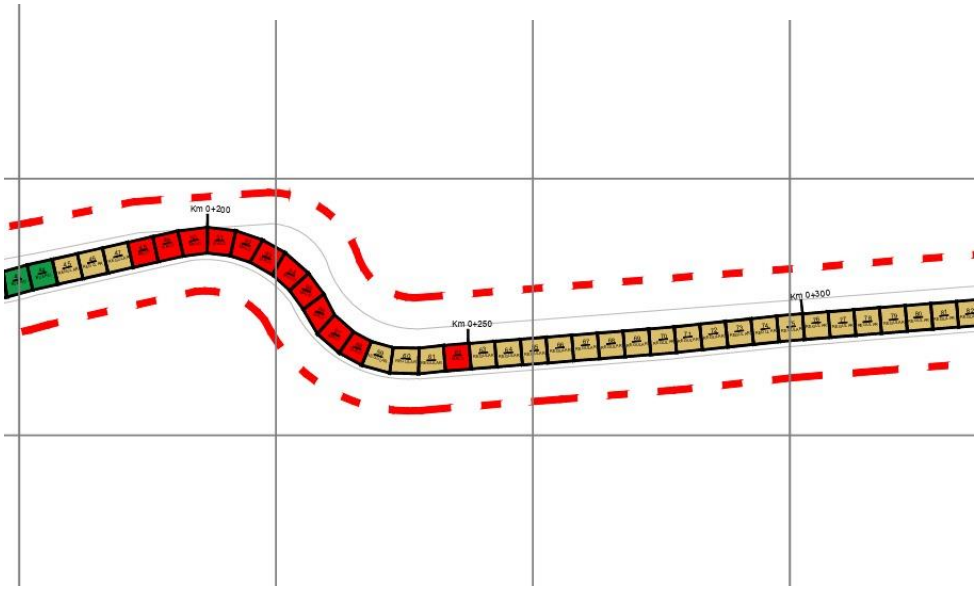
Durante el análisis visual del pavimento construido con RAP, se obtuvieron un total de 1046 imágenes que abarcaban la longitud completa del tramo. Para representar esta información de

manera precisa en AutoCAD, se utilizaron cuadros representativos, de tal manera que cada uno abarcaba una longitud de 4 metros, correspondiente a la distancia entre cada registro fotográfico. Así, las 1046 fotos cubrieron la longitud total de la vía de 4180 metros.

Adicionalmente, se generó un abscisado de la vía cada 50 metros, como se puede observar en la *figura 50* y más detalladamente en el Anexo 10.2 lo que permitió un seguimiento detallado de las áreas de interés identificadas durante el análisis. Esta estructura facilitó la identificación y localización precisa de las áreas problemáticas, lo que contribuyó a una evaluación más exhaustiva y a la generación de recomendaciones específicas para mejorar la calidad y durabilidad del pavimento con RAP en futuros proyectos viales.

Figura 50

Abscisado de vía cada 50 m (AUTOCAD), Fuente: propia



7 ANALISIS Y DISCUSION

Aunque no se realizaron ensayos directos sobre las mezclas elaboradas con RAP, el trabajo de reconocimiento y categorización de imágenes permitió identificar patologías específicas asociadas con el desempeño de las mezclas. La denominación de tramos y patologías proporcionó una base para correlacionar las condiciones del pavimento con el tipo de mezcla utilizado, permitiendo inferir el comportamiento y desempeño de las mezclas de RAP en función de las condiciones observadas en el pavimento.

Visualmente se identificó la variabilidad en la composición del RAP, ver *figura 51*, y es que granulométricamente no cumplen con la norma establecida en el INVIAS, esta diversidad de materiales del pavimento reciclado influye directamente en las propiedades físicas y químicas de las mezclas asfálticas resultantes, esto dio como resultado a las diferentes patologías que se encontraron en la vía.

Figura 51

Sobretamaños en mezcla de RAP Fuente UMV



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

Dentro de la clasificación, cabe destacar que 37 imágenes fueron excluidas del análisis debido a que correspondían a un tramo construido con placa huella, ver *figura 52*, lo cual no era objeto de estudio en este análisis.

Figura 52

Tramo de placa huella en vía Usme La Requilina



Nota. Fotografía suministrada por el ingeniero Alberto Arias, Director de proyectos de obras ruralidad de la UMV

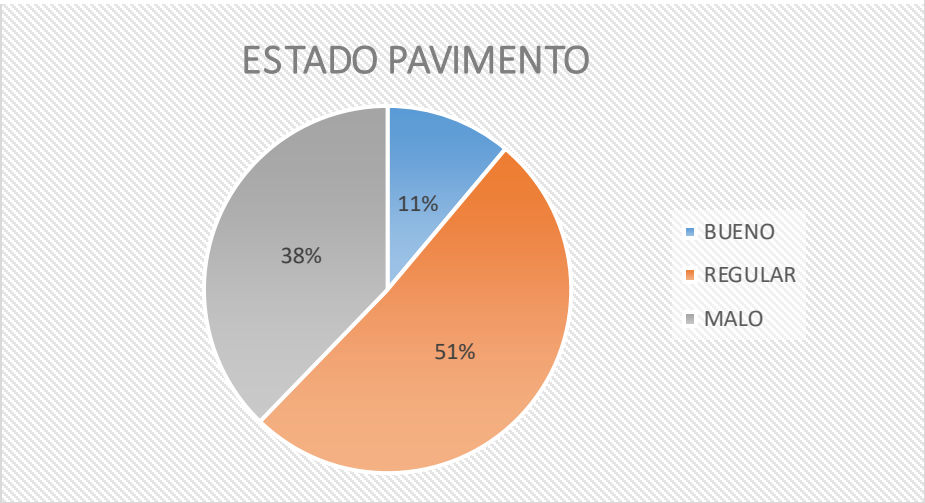
De las 1009 imágenes restantes, se clasificaron 112 como "buenas", 381 como "malas" y 516 como "regulares". Este análisis revela que el estado predominante del pavimento es "regular", ya que representa el 51% del total del tramo evaluado. Le sigue el estado "malo" con una participación del 38%, mientras que el estado "bueno" tiene una presencia más baja, con tan solo el 11% del total del tramo, esto se representa en la *figura 53*.

Esta distribución proporciona una visión clara del estado general del pavimento construido con RAP en el tramo estudiado. La predominancia de imágenes clasificadas como "regulares" indica que existe un nivel significativo de desgaste o deterioro en el pavimento, aunque aún se encuentre en condiciones aceptables para el tráfico vehicular. Por otro lado, la presencia

considerable de imágenes clasificadas como "malas" sugiere la existencia de áreas críticas que requieren intervención inmediata para evitar un deterioro mayor y garantizar la seguridad y funcionalidad de la vía.

Figura 53

Estado según clasificación de pavimento, Fuente: propia



Durante el análisis visual del pavimento construido con RAP, llevamos a cabo una clasificación detallada de cada imagen en función de las diferentes patologías identificadas. Utilizamos las siguientes categorías para describir los tipos de daños observados.

1. Piel de cocodrilo
2. Exudación
3. Agrietamiento en bloque
4. Abultamientos y hundimientos
5. Corrugación
6. Depresión
7. Grieta de borde
8. Grieta de reflexión de junta
9. Desnivel carril/berma
10. Grietas longitudinales y transversales
11. Parcheo

12. Pulimento de agregados
13. Huecos
14. Ahuellamiento
15. Desplazamiento
16. Grieta parabólica
17. Hinchamiento
18. Grieta parabólica (slippage)
19. Desprendimiento de agregados

Además, para cada categoría de patología, asignamos un nivel de severidad entre bueno, malo y regular, Exceptuando la patología de fisuras incipientes, la cual no presenta ningún nivel de severidad.

Esta clasificación nos permitió evaluar de forma visual la gravedad y extensión de los daños presentes en el pavimento.

Tras analizar detenidamente las imágenes de las patologías y evaluar su severidad, se identificaron las siguientes anomalías en el tramo estudiado:

1. Piel de cocodrilo.
2. Fisura de media luna
3. Agrietamiento en bloque
4. Fisuración incipiente
5. Fisura transversal
6. Grieta de borde.
7. Perdida de las capas de estructura
8. Fisuras en bloque
9. Fisura en juntas

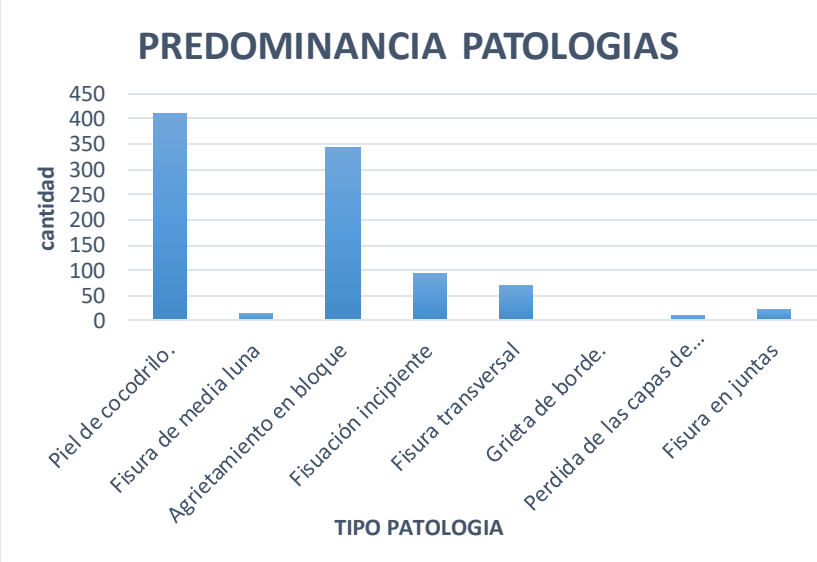
Estás patologías se presentan la *tabla 10 y figura 54*, de acuerdo a la cantidad de imágenes que contienen esta patología, y a su nivel de severidad.

Tabla 10 clasificación imágenes, Fuente: propia

PATOLOGIA	UNIDADES	SEVERIDAD		
		BAJO	MEDIO	ALTO
Piel de cocodrilo.	413	29	50	335
Fisura de media luna	17	1	8	8
Agrietamiento en bloque	345	51	186	108
Fisuración incipiente	94	NA	NA	NA
Fisura transversal	71	48	13	10
Grieta de borde.	3		2	1
Perdida de las capas de estructura	12	0	0	12
Fisura en juntas	22	0	6	16

Figura 54

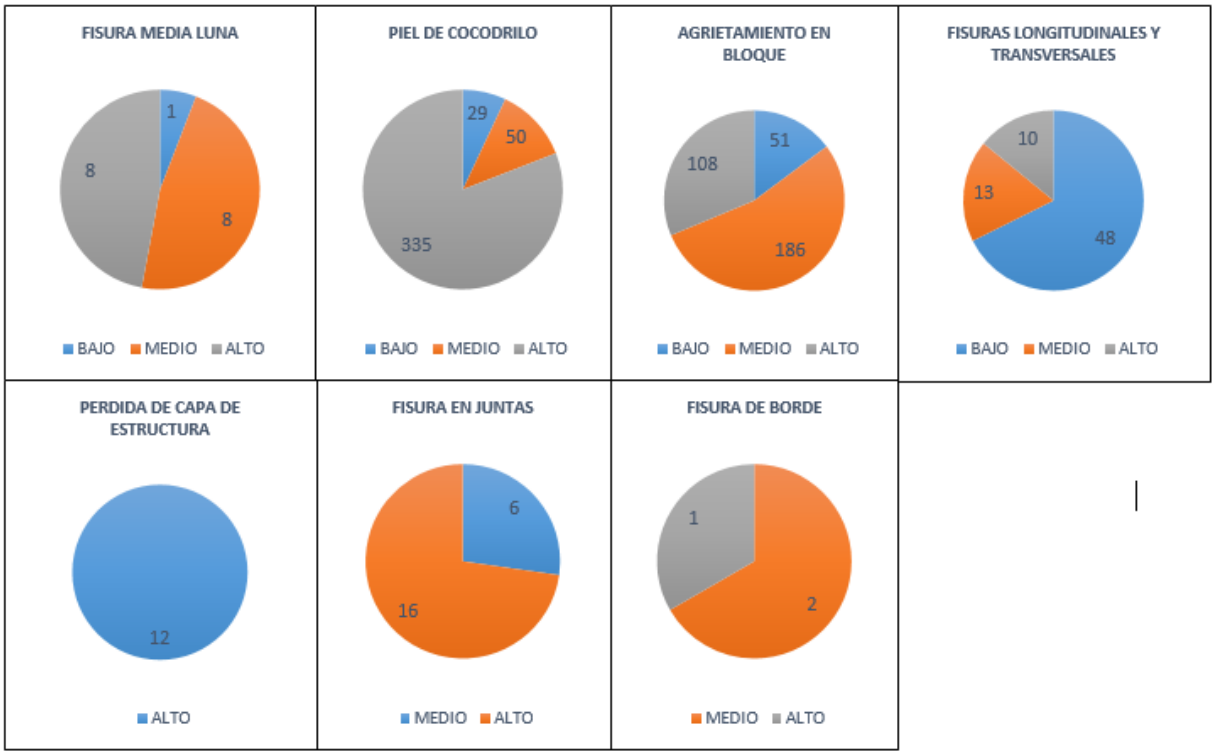
Predominancia de patologías, Fuente: propia



Según su nivel de severidad, analizamos la contribución de cada una de las patologías de la siguiente manera, ver *figura 55*:

Figura 55

Matriz Severidad de Patologías, Fuente: propia



Basándonos en lo expuesto anteriormente, podemos observar que la patología más comúnmente observada es la conocida como "piel de cocodrilo". Esta anomalía se detectó en un total de 413 imágenes de las 1009 analizadas, lo que representa un porcentaje significativo del 40.93% de todas las patologías encontradas en el pavimento. Además, al considerar el nivel de severidad asociado a esta patología, el cual fue clasificado como alto en 335 de las imágenes analizadas, se puede concluir que la "piel de cocodrilo" es la causa principal del deterioro del pavimento en varios tramos.

Posteriormente, se observa que la siguiente patología predominante son los agrietamientos de bloque, detectados en 345 imágenes de las 1009 analizadas. Sin embargo, de estas 345 imágenes, solo 186 presentan un nivel de severidad medio con una participación del 53.91%, 51 imágenes con un nivel de severidad bajo y un porcentaje de participación del 14.78%, y 108 imágenes con un nivel de severidad alta, representando así un porcentaje de participación del 31.30%

Según estos datos, se concluye que esta patología no es la que está causando mayores daños en el tramo estudiado en la actualidad, ya que sólo el 31.30% tiene una severidad alta. No obstante, existe una tendencia a que se convierta gradualmente en una patología más severa, lo que podría resultar en la aparición de patologías más graves en el futuro.

En lo que respecta a la severidad, se observa que las patologías conocidas como pérdida de capa de estructura y la fisura media luna son las que presentan el mayor nivel de severidad. Estas patologías representan las que generan el mayor daño en el tramo estudiado, así como un mayor riesgo para los usuarios de dicha vía. Por lo tanto, es de suma urgencia intervenir estos tramos de forma inmediata para evitar futuros accidentes viales.

Otro aspecto importante que se identificó visualmente, fue la baja deformación en la capa de rodadura, demostrando así una buena resistencia a la deformación. Con respecto a esta particularidad se encontraron varios estudios, como en (Niño, 2017) donde se observa que las mezclas con RAP al 50% para mezclas en caliente en comparación con una mezcla virgen mostro un mejor desempeño en cuanto a deformación, en (Rojas, 2020) donde se estudió varios tramos de vías en el área rural del sur de Bogotá, cerca de la reserva de Sumapaz , encontrando deformaciones permanentes de la mezcla, esto por varios factores, uno de ellos, es la capacidad portante perdida de la base granular debido a aguas de infiltración, otro factor que encontró fue la deficiencia en el diseño y la baja cohesión generando una baja resistencia, finalmente

identifica también la falta de tiempo de curado sin flujo vehicular , deformando así el pavimento.

Para efectos prácticos, estas patologías están ubicadas en las siguientes abscisas:

- Km 0+096, Km 0+124, Km 0+804, Km 0+812, Km 0+816, Km 0+820, Km 0+824, Km 0+888, Km 1+048m, Km 1+068, Km 1+120, Km 1+288, Km 1+292, Km 1+852, Km 1+908, Km 2+083, Km 3+084, Km 3+092 , Km 3+284, Km 3+288, Km 3+292, Km 3+296, Km 3+300, Km 3+416, Km 3+420, Km 3+424, Km 3+504, Km 3+816.

Las cuales se pueden apreciar de una forma más detallada mediante el anexo 10.2 "seguimiento de acuerdo al estado de la vía".

Según la comparación de presupuestos propuestos en la tabla 9, es evidente el aprovechamiento económico en la utilización de RAP en comparación de un pavimento tradicional, con un aprovechamiento del 41,3%, En (Sierra & Zapata, 2015), realizan una comparación económica entre 3 alternativas de mantenimiento, la primera es el reciclaje en frio "*in situ* " la segunda, un mantenimiento convencional y la tercera un refuerzo con una carpeta MDC-2, el análisis se realizó por medio de un árbol de decisiones, y finalmente se llegó a establecer que la mejor alternativa para el mantenimiento corresponde a la primera opción, reciclaje en frio "in situ". Presentando un menor costo de alrededor de un 35%.

8 CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el comportamiento y desempeño de manera cualitativa de mezclas elaboradas con RAP provenientes de desechos de obras de la Unidad de Mantenimiento Vial y usadas en la vial local ubicada en Usme La Requilina, esta evaluación se realizó mediante el análisis visual de imágenes tomadas en campo.

Lo más importante de la evaluación del comportamiento fue la identificación de patologías y condiciones de desgaste que afectan el desempeño de las mezclas con RAP, lo que permitió comprender su comportamiento en condiciones reales de uso. Esto fue fundamental para entender cómo estas mezclas se comportan en comparación con mezclas convencionales, y cómo pueden ser mejoradas en futuras aplicaciones.

Lo que más ayudó a generar esta evaluación fue la combinación de herramientas visuales, cómo la cámara GoPro Hero9 y el GPS Emlid eTrex 32X que fueron fundamentales a la hora de recopilar información precisa sobre el pavimento construido con RAP. El proceso de filtrado y generación de registros cada 4 metros permitió un análisis detallado de las condiciones del pavimento reciclado. De igual manera, el enlace entre las imágenes y el entorno geoespacial, respaldado por las coordenadas precisas de la Secretaría de Movilidad, garantizo la fidelidad de la información. Además, la Ortofoto proporcionada por la Secretaría de movilidad mejoró la precisión espacial y contextualizó las imágenes en el entorno real, Generando así un modelo de visualización práctico mediante el software AutoCAD, el cual se puede modificar fácilmente según el estado futuro del pavimento. De igual forma la colaboración del equipo de investigación de la Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UAERMV), permitió acceder a información valiosa, cómo lo fueron esquemas constructivos, ensayos de laboratorio y registros fotográficos del proceso de ejecución del tramo estudiado. Esta

información, combinada con la recopilación de ensayos, estudios y normativas nacionales e internacionales, así como la visita a la planta de producción de la Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial permitió realizar un exhaustivo análisis de las vías construidas con RAP. Este análisis incluyó ensayos de laboratorio, análisis económicos y diseños de pavimentos.

Lo más difícil en la generación del proceso de evaluación fue la identificación y clasificación precisa de las patologías presentes en el pavimento, ya que algunas de ellas podían ser sutiles o difíciles de distinguir visualmente. Además, la interpretación de los datos visuales recopilados requería un análisis minucioso para asegurar la precisión de los resultados. Sin embargo, mediante el uso de criterios establecidos, fue posible superar estos desafíos y obtener resultados confiables y significativos.

En términos económicos, la comparación de costos entre la alternativa de pavimento con RAP y la pavimentación en caliente (MDC-19) revelo una diferencia significativa. El pavimento con RAP se presenta como una opción más económica, con una diferencia en pesos colombianos de 1.802.523.065 COP, lo que representa un 58.62% menos que la pavimentación con MDC-19. Este análisis respalda la viabilidad económica de utilizar RAP para mejorar las vías terciarias, ofreciendo una alternativa eficiente y rentable en comparación con métodos convencionales. Por lo cual la implementación de pavimentos con RAP no solo representa una mejora sustancial en las condiciones de las vías terciarias, sino también demuestra ser una opción económicamente viable.

La clasificación del pavimento en buen estado, regular y malo reveló que el 51% está en estado regular, el 38% en mal estado y el 11% en buen estado. Este análisis proporciona una visión clara del estado general del pavimento y señala la necesidad de intervención en áreas

críticas. Al clasificar las imágenes según sus patologías, se identificaron anomalías como "piel de cocodrilo" y agrietamientos en bloque como las más comunes. La distribución de estas patologías sugiere la urgencia de abordar áreas con pérdida de capas de estructura y fisuras media luna debido a su alta severidad y riesgo asociado.

Finalmente, la superación de la vida útil del pavimento y su avanzado estado de deterioro subrayan la urgente necesidad de intervención. Un enfoque proactivo en el mantenimiento y reparación es fundamental para garantizar la seguridad de los usuarios de la vía y prolongar la vida útil restante del pavimento en la medida de lo posible. Es importante destacar que esta intervención cumplió con su objetivo de mejorar la calidad de vida de los habitantes de Usme La Requilina, mejorando el estado de sus vías de forma rápida y económica, dado que esta comunidad no contaba con los recursos económicos para mitigar esta problemática en un corto plazo.

Lo anterior nos permite decir que, aunque el pavimento construido con RAP aún se encuentra en condiciones aceptables para el tráfico vehicular, es necesario realizar intervenciones de mantenimiento y rehabilitación de manera periódica para garantizar su durabilidad y funcionalidad a lo largo de su vida útil de 5 años. Estos hallazgos pueden ser de gran utilidad para el desarrollo de políticas y estrategias para la gestión sostenible de los recursos y la infraestructura vial en entornos urbanos y rurales. Por último, Se sugiere realizar estudios adicionales para optimizar las proporciones de RAP en las mezclas asfálticas y evaluar su desempeño a largo plazo en condiciones específicas de Usme la Requilina. Además, investigaciones futuras podrían centrarse en la influencia de factores climáticos y ambientales en el comportamiento de estas mezclas, proporcionando una visión más completa de su viabilidad en diferentes contextos urbanos de Bogotá.

9 BIBLIOGRAFIA

Convenio interadministrativo (INVIAS- Universidad Nacional). (2006). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. *Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*. Bogotá, Colombia.

(UMV), Unidad administrativa de rehabilitacion y mantenimiento vial. (17 de diciembre de 2018). Estudiar la respuesta mecánica y dinámica de mezclas asfálticas fabricadas con pavimento reciclado (RAP). Bogotá, Colombia.

Bonilla, Y. C. (2019). Historicidad del transporte en Colombia, un proceso de transición y rupturas. *Tzintzun. Revista de Estudios Históricos*, núm. 69, 193–217.

Corredor, R. H. (2013). Dinánima de las construcciones por usos de la localidad de usme en los años 2002 y 2012. Bogotá, Colombia: Alcaldia Mayor de Bogotá.

Diario Portafolio . (2023). *Venta de vehículos en Colombia durante 2022 subió 4,8%.* Obtenido de https://www.portafolio.co/economia/venta-de-vehiculos-en-colombia-en-2022-576383

Eduardo, D. L., Eduardo, B. L., Lugo, A. E., & Guillermo Montoya, P. (2016). La indigenización del mercado: el caso del intercambio de productos en las comunidades indígenas de Tarapacá en la Amazonía colombiana. *POLIS Revista Latinoamericana.*

Enciso, A. P., & Martinez, C. M. (Marzo de 2021). Documento compilatorio de proyectos de investigación de nuevas tecnologías periodo periodo 2016-2020. Bogotá, Colombia: Unidad adminsitrativa especial de rehanilitacion y mantenimiento vial.

Federal Highway Administration Research and Technology. (2012). *Reciclaje de pavimento asfáltico con pavimento asfáltico recuperado (RAP).* Obtenido de https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/rap/

Hernández, P. J. (2014). Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas. Bogotá, Colombia.

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (28 de octubre de 2011). Resolucion numero 4428 del 28 de octubre de 2011. Bogotá, Colombia.

Instituto Nacional de Vias (INVIAS). (Noviembre de 2022). Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022. Colombia.

Martinez, C. E. (2019). Evaluación y comparación de desempeño de una mezcla asfáltica con altos contenidos de RAP a escala real y una mezcla convencional tipo MD-12. Bogotá: Unidad administrativa especial de rehabilitación y mantenimiento vial .

Martínez, C. E. (2019). Evaluación y comparación de desempeño de una mezcla asfáltica con altos contenidos de RAP a escala real y una mezcla convencional tipo MD-12. Bogotá, Colombia.

Miranda Argüello, F., & Aguiar Moya, J. P. (Enero de 2019). Mezclas asfálticas con rap:

pavimentos asfálticos reciclados. *PITRA-LanammeUCR*, Volumen 10, N.°1.

Mora, J. A. (2020). Aprovechamiento de reciclado RAP: para mejoramiento de las vías terciarias en Colombia. Bogota.

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2001). Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual. Washington , United states.

Niño, P. A. (2017). Evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica densa en caliente tipo msc-25 del invias con alto contenido de rap (50%). Bogotá, Colombia.

Rebolledo, R. J. (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Chile.

Rojas, R. V. (2020). Evaluación del comportamiento de mezclas elaboradas con rap proveniente de desechos del idu y la umv que están siendo aplicadas en vias rurales de bogotá. Bogotá, Colombia.

Sierra, H. A., & Zapata, S. A. (2015). Estudio de las ventajas económicas del reciclaje en frío in situ de pavimentos asfalticos. Medellín, Colombia.

The Federal Highway Administration (FHWA). (Abril de 2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. McLean, United States.

Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UMV). (2024). *Material RAP (Pavimento Asfáltico Recuperado).* Obtenido de https://www.umv.gov.co/portal/nuestros-servicios/#1489850332561-786de074-a8cc

10 ANEXOS

10.1 ANALISIS DE PATOLOGIA USME LA REQUILINA (XLSX)

10.2 SEGUIMIENTO DE ACUERDO AL ESTADO DE LA VIA (PDF, DGW)

10.3 REGISTRO FOTOGRAFICO