

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería en Vialidad y Transportes

**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y DISEÑO DE LA REHABILITACIÓN DEL
PAVIMENTO ASFÁLTICO, EMPLEANDO UNA BASE ASFÁLTICA RECICLADA CON
CEMENTO, EN LA CARRETERA MACAS – SINAI, UBICADA EN LA PROVINCIA DE
MORONA SANTIAGO**


Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Magister en
Ingeniería en Vialidad y Transportes

Autor:

Jairo Fernando Tipán Guañuna

Director:

Juan Sebastián López Zhindon

ORCID:  0009-0001-8368-7586

Cuenca, Ecuador

2023-09-26

Resumen

Las vías son el patrimonio vial tangible y debe darse importancia nacional, conservándole siempre en condiciones provechosas y seguras, por ello es importante plantear estrategias de intervención amigables ambientalmente en la conservación y mantenimiento vial. El desarrollo de la presente investigación se enfoca en el tramo vial estatal E45 Macas Entrada a Sinaí de 25 kilómetros aproximadamente, en pavimento flexible. Se realizó evaluaciones con el objeto de observar y monitorear de primera mano, el deterioro, la estructura del pavimento frente a las cargas vehiculares, calidad de los materiales existentes y condiciones medioambientales, se evidenció fallas de tipo piel de cocodrilo, fisuras longitudinales por fatiga y por contracción térmica, en un índice superficial tiene un rango 5 a 7 al aplicar la metodología VIZIR correlaciona pavimentos, estructuralmente se encontró que existen deflexiones características sobre los 500 um se estima que son sitios que requieren refuerzo estructural, lo que significa no existe deficiencia en las capas intermedias; planteándose dos opciones; la primera es un proceso constructivo tradicional con materiales cien por ciento granulares y la segunda realizar un rap (reciclaje de los materiales asfálticos del pavimento). Esta última alternativa requiere de \$ 353.070,10 más IVA para obra de construcción y \$ 133.294,56 más IVA para mantenimiento por cada kilómetro de intervención, se estima un ahorro del 18% y 46% respectivamente. Finalmente, con la presente investigación, se establece que es necesario que las entidades y agencias que administran el patrimonio vial, enfoquen decisiones de intervención basándose en el análisis técnico, económico y ambiental.

Palabras clave: reciclaje, estabilización con cemento, emisiones de carbono, consumo de energía ambiental



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Roads are tangible road heritage and must be given national importance, always preserving them in useful and safe conditions, which is why it is important to propose environmentally friendly intervention strategies in road conservation and maintenance. The development of this research focuses on the state road section E45 Macas Entrance to Sinaí of approximately 25 kilometers, on flexible pavement. Evaluations were carried out in order to observe and monitor first-hand, the deterioration, the structure of the pavement against vehicular loads, the quality of the existing materials and environmental conditions, crocodile skin type failures, longitudinal cracks due to fatigue and due to thermal contraction, in a surface index it has a range of 5 to 7 when applying the VIZIR methodology it correlates pavements, structurally it was found that there are characteristic deflections above 500 μm , it is estimated that they are sites that require structural reinforcement, which means there is no deficiency in the intermediate layers; considering two options; The first is a traditional construction process with one hundred percent granular materials and the second is to perform a rap (recycling of asphalt pavement materials). This last alternative requires \$353,070.10 plus VAT for construction work and \$133,294.56 plus VAT for maintenance for each kilometer of intervention, an estimated saving of 18% and 46% respectively. Finally, with this research, it is established that it is necessary for the entities and agencies that manage road heritage to focus intervention decisions based on technical, economic and environmental analysis.

Keywords: recycling, cement stabilization, carbon emissions, environmental energy consumption



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de Contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Dedicatoria.....	13
Agradecimiento.....	14
Capítulo I: Generalidades.....	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Planteamiento del Problema.....	22
1.3 Objetivos.....	24
1.3.1 Objetivo General.....	24
1.3.2 Objetivos Específicos.....	24
1.4 Metodología a desarrollar.....	24
1.4.1 Fase I: Reconocimiento del sitio.....	24
1.4.2 Fase II: Desarrollo de las evaluaciones al pavimento.....	24
1.4.3 Fase III: Análisis e Interpretación de datos.....	27
1.4.4 Fase IV: Conclusiones y Recomendaciones del trabajo.....	27
1.5 Zona de ubicación y área de influencia.....	27
1.5.1 Demarcación geográfica.....	27
1.5.2 Descripción del corredor vial.....	28
1.5.3 Clima.....	29
1.5.4 Reseña de la construcción del proyecto.....	29
1.6 Marco Conceptual.....	30

1.6.1	Conservación vial	30
1.6.2	Evaluación de pavimentos en servicio y diseño de obras de mejoramiento ..	30
1.6.3	Técnicas de rehabilitación de pavimentos flexibles	39
1.6.4	Reciclaje de pavimentos flexibles	40
Capítulo II: Evaluación Y Análisis Del Tramo Vial en Estudio.....		44
2.1	Evaluación funcional	44
2.1.1	Aplicación del levantamiento de información de inspección visual	45
2.1.2	Determinación de las unidades de muestra para la evaluación.....	46
2.1.3	Levantamiento visual de daños en el pavimento.	48
2.1.4	Estado de condición del pavimento flexible de la metodología VIZIR.....	56
2.2	Evaluación geotécnica del tramo vial.....	64
2.3	Evaluación estructural del pavimento	65
2.3.1	Metodología de recolección de datos de deflectometría.....	66
2.3.2	Ubicación de los puntos tomados en cada progresiva	67
2.3.3	Segmentación de la vía	67
2.3.4	Deflexiones del Tramo 1: Macas – Entrada a Sinai (0+000 – 25+005)	68
2.3.5	Deflexiones del Tramo 2: Entrada a Sinai - Macas 24+099 – 0+000.....	70
2.3.6	Capacidad Estructural del tramo 1 y tramo 2	72
2.4	Evaluación cualitativa del pavimento flexible basados en los resultados de deflectometría.....	72
2.5	Resumen de resultados encontrados en la evaluación funcional (inspección visual) y la evaluación estructural del pavimento flexible.	75

3	Capítulo III: Rehabilitación del Pavimento	80
3.1	Período de diseño	80
3.2	Tránsito de diseño	80
3.2.1	Tránsito promedio diario anual	80
3.2.2	Tasas de crecimiento	81
3.2.3	Número de ejes equivalentes (ESAL).....	81
3.3	Diseño de alternativas de rehabilitación.....	83
3.3.1	Resumen de resultados de evaluación estructural, funcional, geotécnica y cualitativa de las secciones del tramo vial Macas Entrada a Sinai	86
3.3.2	Alternativas de intervención con la determinación de esfuerzos admisibles..	87
3.3.3	Resumen de Intervenciones propuestas	92
	Capítulo IV: Análisis Técnico-Económico-Ambiental	92
4.1	Análisis técnico	93
4.2	Análisis ambiental.....	96
4.3	Análisis económico.....	99
	Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones	106
5.1	Conclusión respecto del objetivo general.....	106
5.2	Conclusión respecto del objetivo específico 1	106
5.3	Conclusión respecto del objetivo específico 2.....	107
5.4	Conclusión respecto del objetivo específico 3.....	107
5.5	Recomendación respecto del objetivo general.....	107
5.6	Recomendación respecto del objetivo específico 1	107

5.7	Recomendación respecto del objetivo específico 2.....	108
5.8	Recomendación respecto del objetivo específico 3.....	108
5.9	Recomendaciones de futuras investigaciones	108
	Referencias	109
	Anexos	119

Índice de figuras

Figura 1: Mapa Geológico del área de estudio	26
Figura 2: Mapa de Ubicación del área de estudio.....	28
Figura 3: Perfil de Elevación del tramo Macas-Sinaí	29
Figura 4: Evaluación funcional de pavimentos con determinación de deterioro superficial, regularidad superficial, resistencia al deslizamiento y medición del ruido.....	32
Figura 5: Baches según la severidad.....	35
Figura 6: Pérdida de agregado y/o peladura de la superficie.....	35
Figura 7: Ahuellamiento según nivel de severidad.....	36
Figura 8: Grietas longitudinales según nivel de severidad	36
Figura 9: Fisuras en bloque según nivel de severidad.....	37
Figura 10: Piel de cocodrilo según nivel de severidad	37
Figura 11: Hundimiento según nivel de severidad	38
Figura 12: Exploración de materiales en el pavimento	38
Figura 13: Toma de datos deflectométricos del pavimento con FWD.....	39
Figura 14: Proceso Constructivo de Base Estabilizada con cemento en materiales reciclados .	42
Figura 15: Esquema de Mezclado en sitio	43
Figura 16: Esquema de las unidades de muestreo a ser evaluadas.....	47
Figura 17: Formato de exploración referido al Formato B1. Registro de deterioros en pavimentos flexibles	49
Figura 18: Falla en sección 1 (0+000 a 1+500) de fisuras longitudinales acompañadas de piel de cocodrilo y en otros casos se observa grietas por contracción térmica.	50
Figura 19: Fallas en la sección 2 (1+500 a 2+750) de fisuras longitudinales acompañadas de abultamientos, depresiones y piel de cocodrilo.....	51
Figura 20: Falla de baches, huecos y piel de cocodrilo sobre la calzada.....	51

Figura 21: Fallas de la sección 3 (2+750 hasta la 6+250) de fisuras longitudinales acompañadas de piel de cocodrilo, hundimientos longitudinales, y grietas por contracción térmica.....52

Figura 22: Fallas en la sección 4 (6+250 a 7+250) de fisuras en bloque acompañadas de piel de cocodrilo y grietas por contracción térmica.....52

Figura 23: Fallas de piel de cocodrilo53

Figura 24: Falla en la sección 5 (7+500 a 10+000) de grietas por contracción térmica acompañadas de piel de cocodrilo53

Figura 25: Fallas en la sección 6 (10+000 hasta la 15+000) donde se distingue grieta longitudinal por contracción térmica acompañadas de piel de cocodrilo.....54

Figura 26: Fallas en la sección 7 (15+000 a 16+000), carril izquierdo, caracterizadas por grietas longitudinales por fatiga.....54

Figura 27: Fallas en la sección 7 (15+000 a 16+000) en la que se observa piel de cocodrilo ...55

Figura 28: Fallas superficiales de la sección 8 (16+000 a 25+000) caracterizadas por piel de cocodrilo acompañado de grietas longitudinales por fatiga y ahuellamiento.....55

Figura 29: Determinación de tramos homogéneos en base de los resultados del inventario de fallas superficiales en el pavimento flexible.57

Figura 30: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 159

Figura 31: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 260

Figura 32: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 360

Figura 33: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 461

Figura 34: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 562

Figura 35: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 663

Figura 36: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 763

Figura 37: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 864

Figura 38: Perfil Estratigráfico del tramo vial investigado.....	65
Figura 39: Apliques realizados en el tramo de análisis para evaluación estructural	67
Figura 40. Secciones Homogéneas a través del método estadístico de diferencias acumuladas del reporte de deflexiones carril derecho, Tramo Macas Entrada a Sinai.	68
Figura 41: Reporte de deflexiones respecto de la abscisa en el carril derecho sentido Macas-Entrada a Sinai.	69
Figura 42: Secciones Homogéneas a través del método estadístico de diferencias acumuladas del reporte de deflexiones carril izquierdo, Tramo Entrada a Sinai Macas.	70
Figura 43. Reporte de deflexión máxima respecto de la abscisa en el carril izquierdo, sentido Macas- Entrada a Sinai.	71
Figura 44: Parámetros de evaluación deflectométrica cualitativa	74
Figura 45: Reporte de deflexiones e índice de condición superficial en el tramo Macas- Entrada a Sinai.	76
Figura 46: Reporte de deflexiones máximas en el tramo Macas- Entrada a Sinai.	78
Figura 47: Número estructural efectivo y requerido a 10 años para el carril derecho e izquierdo.	85
Figura 48: Esquema de la intervención propuesta para la rehabilitación del tramo Macas-Sinaí (km 0+000 al km 25+005).....	92
Figura 49: Comparación de alternativas de rehabilitación en cuanto a la resistencia de esfuerzos en el período de vida útil.	96
Figura 50: Consumo de energía total de las estrategias de intervención.....	98
Figura 51: Emisiones de carbono total de las estrategias de intervención.....	98
Figura 52: Presupuesto referencial de mantenimiento de las alternativas planteadas.....	102
Figura 53: Presupuesto referencial de mantenimiento de las alternativas planteadas.....	104

Índice de tablas

Tabla 1: Técnicas de rehabilitación usadas en los últimos 10 años en el Ecuador	15
Tabla 2: Rango de Is según metodología Vizir	34
Tabla 3: División de unidades de muestra	47
Tabla 4: Nivel de los deterioros en pavimentos asfálticos para carreteras tipo A	48
Tabla 5: Nivel de los deterioros en pavimentos asfálticos para carreteras tipo B	49
Tabla 6: Secciones Homogéneas	58
Tabla 7: Tramos del Corredor vial de Macas Entrada a Sinai (0+000 – 25+005).....	67
Tabla 8: Deflexión Característica de las secciones homogenizadas en el carril derecho del Tramo 1 Macas Entrada a Sinai	69
Tabla 9: Deflexión Característica de las secciones homogenizadas en el carril izquierdo del Tramo 1 Entrada a Sinái - Macas	71
Tabla 10: Cálculo de SN efectivo de los tramos evaluados.	72
Tabla 11: Parámetros empleados para la Evaluación Deflectométrica Cualitativa	73
Tabla 12: Resultados de Parámetros Evaluación Deflectométrica Cualitativa	74
Tabla 13: Tasas de crecimiento vehicular de la provincia de Morona Santiago.....	81
Tabla 14: Factores de ejes equivalentes adoptados.....	82
Tabla 15: Cálculo del número de ejes equivalentes a 8.2 Ton.....	83
Tabla 16: Resumen del análisis de vida residual y espesor de refuerzo con metodología AASHTO/93.....	85
Tabla 17: Resultados de evaluación estructural y funcional del tramo vial Macas Entrada a Sinái	87
Tabla 18: Resumen de intervención propuesta	92

Tabla 19: Resultados de módulo elástico y resistencia a la compresión del material reciclado agregando 7 % de cemento MH	94
Tabla 20: Resultados de módulo elástico y resistencia a la compresión del material reciclado agregando 3 % de cemento MH	94
Tabla 21: Resultados granulométricos de las capas asfálticas	94
Tabla 22: Presupuesto referencial de construcción - Alternativa 1 (Fresado y reposición de carpeta)	100
Tabla 23: Presupuesto referencial de construcción - Alternativa 2 (Fresado y Recuperación de materiales mezclados con aglutinante(cemento)	101
Tabla 24: Presupuesto referencial de mantenimiento - Alternativa 1	103
Tabla 25: Presupuesto referencial de mantenimiento - Alternativa 2	104

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a 3 mujeres que han sido los pilares importantes de mi vida hasta el momento, a mi abuelita quien me cuida desde el cielo y sé que desde ahí está alegre por este logro tan importante, a mi madre que creyó en invertir en mi educación y gracias a esa decisión pude salir adelante y convertirme en un profesional de la ingeniería civil y a mi novia quien me ha apoyado al máximo para culminar con éxito esta etapa académica, y me ha enseñado que la familia es lo más importante que tenemos en nuestra vida y hay que cuidarla.

Sin la inspiración que he tenido de ellas, nada de esto fuese posible, por eso esto va dedicado para ustedes mis 3 mujeres valientes.

Jairo Fernando Tipán Guañuna

Agradecimiento

Agradezco de manera especial a la Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, inicialmente por haber podido ser parte del selecto grupo de maestrantes de la tercera cohorte de la Maestría en Ingeniería en Vialidad y Transportes, tengan la certeza que los conocimientos recibidos en este programa de maestría desde ya son aplicados en beneficio de la infraestructura vial del país y de la gente buena.

De manera especial agradecer a los docentes del programa de maestría, a mi director de proyecto de titulación, a mis lectores, a todos mis amigos que me han apoyado sobre todo en esta última etapa del proyecto de titulación, y finalmente a todo el personal administrativo de la Universidad de Cuenca que han prestado todo su apoyo en todas las etapas del proceso de titulación, gracias infinitas a todos por trabajar juntos y ser parte de este logro académico muy importante en mi vida.

Jairo Fernando Tipán Guañuna

Capítulo I: Generalidades

1.1 Introducción

La rehabilitación de la red vía estatal a nivel nacional se la ejecuta mayoritariamente restaurando y recomponiendo las estructuras de pavimentos con materiales cien por ciento granulares, esta es una técnica constructiva tradicionalista que se enmarca en los rubros constantes de los contratos del MTOP (MTOP, 2020) y las especificaciones generales para la construcción de puentes y caminos MOP-001-F-2002 del Ecuador, los cuales siguen vigentes desde hace 19 años. Situación que ha limitado, el uso y la innovación de nuevos materiales en la rehabilitación de carreteras. Hoy en día, las técnicas de rehabilitación son diversas y en el mercado local de la construcción se encuentran materiales que permiten optimizar: tiempo de ejecución, recursos, transporte de material, disminuye el ruido ambiental, ayuda a disminuir enfermedades relacionadas con la contaminación, reducción de emisiones de CO₂.

Todas las técnicas dependen del nivel de intervención que se requiere realizar. Sin embargo, en nuestro medio aún se continúa trabajando con técnicas de rehabilitación tradicionales, comunes desde hace 10 años, verificados en la base de datos del portal de compras públicas del Ecuador y en las publicaciones del Ministerio de Transporte de Obras Públicas del Ecuador, como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 1: Técnicas de rehabilitación usadas en los últimos 10 años en el Ecuador

Año	Proyecto	Entidad contratante	Descripción de intervención
2021	Rehabilitación de vías con rap estabilizado con emulsión asfáltica, relleno y re conformación en Coop. Trinidad de Dios, Caminos Reales y 31 de Octubre – parroquia Pascuales	Municipalidad de Guayaquil	Reutilización de carpeta asfáltica
2019	Rehabilitación y mejoramiento de la vía Machala-La Iberia (vía La Primavera), cantón Machala, Provincia de EL Oro	Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de El Oro	Fresado de carpeta asfáltica, y colocación de carpeta asfáltica de 3" con una capa de base clase I
Año	Proyecto	Entidad contratante	Descripción de intervención

2019	Mantenimiento por resultados de la carretera E40: Zhud - Biblián, E35 Zhud-Angas, E40 Zhud – Cochancay – El Triunfo, E58 troncal – Puerto Inca.	Ministerio de Transporte y Obras Públicas	Fresado de las capas superiores, colocación de una base estabilizada con cemento y colocación de una capa de hormigón asfáltico de 5 y 10cm con una capa de micropavimento tipo III
2018	Rehabilitación de la calle principal de la Cdla. María Sol de la ciudad de Calceta, cantón Bolívar.	Gobierno Municipal del cantón Bolívar	Fresado de la carpeta asfáltica y reposición con una carpeta nueva de 2", riego de liga y resaneo de baches
2018	Rehabilitación de la vía Piedra Grande-Ventanas ubicada en la Provincia de los Ríos de 17km de longitud	Dirección Distrital 12d01-Baba-Babahoyo-Montalvo- Los Ríos-MTOP	Fresado de carpeta asfáltica y capas de base, colocación de una nueva carpeta asfáltica de 3" y base clase IV
2017	Rehabilitación de la carretera Chiritza-Cuyabeno-Puerto el Carmen de Putumayo	Dirección Distrital 21d02c01-Nueva Loja-Sucumbios-MTOP	Colocación de carpeta asfáltica de 2", base clase 2 y subbase clase 4.
2016	Rehabilitación a nivel de carpeta asfáltica de 3" de la vía Paute-Bulan-Matrama en una longitud de 15.0 km, ancho promedio de 7m, del cantón Paute, provincia del Azuay	Gobierno Provincial del Azuay	Colocación de carpeta asfáltica de 2", base clase II, geomalla biaxial BX100 y subbase clase IV
2011	Rehabilitación de calles con asfaltado, construcción de bordillos-cunetas y aceras en las calles José Rugel entre Nicolás Martínez y Efraín Ayala	Gobierno Municipal de Santa Lucía	Colocación de carpeta asfáltica de 2", base clase IV, subbase clase III
2011	Rehabilitación, señalización y mantenimiento de la vía Ancon – Anconcito de 3.5 km de longitud	Ministerio de Transporte y Obras Públicas	Fresado de la capa superficial, y reposición con una nueva carpeta asfáltica de 3", base clase I
2009	Rehabilitación de la vía los Ángeles entre las Palmeras y familia Carriel desde la abscisa 0+000 hasta la abscisa 3+500	Ministerio de Transporte y Obras Públicas	Colocación de material granular con base clase I y subbase granular clase III
2009	Ampliación y reconstrucción de la carretera Ambato-Pelileo; tramo Rio Pachanlica-El Corte-Pelileo", de	Ministerio de Transporte y Obras Públicas	Colocación de carpeta asfáltica de 2", base granular clase 1a,

	7,10 km. de longitud, provincia de Tungurahua		subbase granular clase II
--	---	--	---------------------------

En este contexto la tabla 1 señala, que las técnicas de rehabilitación de vías, empleadas en nuestro país desde el año 2009, y ejecutadas por diversas entidades que tienen estas competencias: locales, regionales y gubernamentales han usado materiales pétreos, y han desalojado materiales existentes, como es el caso de fresado de la capa existente y colocación de una nueva capa de rodadura.

Actualmente existen técnicas de rehabilitación modernas y sofisticadas que permiten la reutilización del material de la carretera en donde se va efectuar la rehabilitación, construcción, y/o aplicación de tal o cual producto que permite la optimización del recurso y materia prima; cito un ejemplo: El reciclaje de pavimento asfáltico es una técnica especial que permite la reconstrucción de los pavimentos envejecidos y/o deteriorados, empleando sus materiales de construcción originales. De igual manera, la construcción de la capa de base estabilizada se lo realiza con cemento; lo cual comprende la mezcla, homogenizada, humedecida, compactada y el acabado final con capa de agregados estabilizados y cemento, los agregados pueden ser los que están dentro de la estructura de pavimento. (Rodríguez Mineros & Rodríguez Molina, 2004)

De la misma forma están los tratamientos superficiales, los cuales se colocan en la superficie para alargar la vida útil del pavimento (Gonzalez Herrera, 2013).

Por lo antes expuesto, es imperioso que desde el ente rector de la vialidad nacional (MTOPE), se plantee modernas técnicas de rehabilitación para la intervención y mejoramiento de la red vial nacional, considerando la perspectiva del desarrollo tecnológico, la crisis energética en los precios de los productos derivados del petróleo, y el aspecto ambiental, con el fin de aprovechar los recursos económicos y ambientales y de esta forma contribuir en la conservación del medio ambiente.

La Red Estatal E45, en el tramo Macas-Sinaí, es uno de los tramos viales en la arteria estatal más importante de la Troncal Amazónica, constituye un corredor importante para la conexión de la Amazonia Norte y Sur del país, lo que ha permitido el desarrollo social y económico de sus comunidades con actividades comerciales y turísticas.

Ante ello, el mantenimiento vial de este corredor es fundamental, por lo que se plantean estrategias, técnicas de rehabilitación actuales y amigables con la naturaleza; facilita el

movimiento continuo, conservación y la transitabilidad vial, misma que se traduce en reducción de costos de operación vehicular, conservación del medio ambiente, disminución presupuestaria para hacer frente a la continua y efectiva conservación, rehabilitación y construcción.

Por lo tanto, el tema planteado en el presente proyecto de fin de carrera está orientado en evaluar el nivel de deterioro de la vía mencionada, con la utilización de metodologías de evaluación funcional, la cual consiste en efectuar a través de un inventario vial las fallas superficiales que se presentan en la capa de rodadura con el objeto de cuantificar y calificar su condición por medio de la metodología VIZIR, en donde se obtuvo que la superficie presenta un alto deterioro y cuyos indicativos de manera superficial demuestran agrietamientos y piel de cocodrilo, fisuración y deformaciones abundantes, fallas tipo A (fallas producto de sobrecarga), que afectan el confort del usuario vial y que son afectaciones que se encuentran en la mayoría del tramo estudiado Macas –Sinaí un rango de deflexiones que van desde 429 a 800 μm , las cuales comparadas con los indicadores de calidad de mantenimientos de vías concesionadas por APP del corredor Santo Domingo – Buena Fe, se considera que una deflexión mayor a 500 μm , significa un incumplimiento en el nivel y calidad de servicio de la vía.

Posteriormente se efectuó el análisis técnico, ambiental y económico sobre las alternativas de rehabilitación y se demostró que el reciclar el material proveniente de las capas asfálticas, al ser mejorados y tratados con un 3% de cemento, alcanzó una resistencia a la compresión de 18.50 kg/cm^2 y un módulo elástico de 1500 MPa, en el que se estima que se controlará el agrietamiento por contracción ya que es muy leve o imperceptible, conforme lo indica Arce (2011); quien especifica que el agrietamiento muy leve o imperceptible se da cuando la $R_c 7 \leq 20 \text{ kg}/\text{cm}^2$ de la resistencia a la compresión durante 7 días. También se encontró que ambientalmente se reduce el impacto; los costos de construcción y mantenimiento reducen un 18% y 46% respectivamente, haciendo una comparación con la rehabilitación mediante procesos tradicionales.

Murillo Vázquez (2010) establece, que los valores típicos de resistencia a la compresión simple a 7 y 28 días en materiales como GW van desde 21 a 70 kg/cm^2 . De igual manera Cedeño Plaza y Ávila Armijos (2013), hacen mención que de acuerdo a la Tabla N° 22 de su investigación el rango de resistencia que deben alcanzar los suelos estabilizados con cemento a los 7 días de curado es de 18 Kg/cm^2 a 30 Kg/cm^2 , con lo que se confirma que la resistencia a la compresión encontrada en el estudio y análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio, del

tramo vial Macas-Sinaní, se encuentra dentro de los parámetros de resistencia, haciendo notar que a medida que el tiempo transcurre dichos materiales alcanzan su máxima resistencia.

Seguidamente, con la determinación de los esfuerzos que va a soportar la estructura del pavimento proyectadas al año 10, más los resultados de la evaluación estructural cualitativa y cuantitativa del cuenco de deflexiones; se presenta la propuesta de intervención en la estructura de pavimento que resiste los esfuerzos y deformaciones más allá del periodo de diseño, ampliando la vida útil del pavimento. Posteriormente, se planteó las intervenciones que responden a las premisas de ser amigables con el ambiente, económicas y duraderas, las cuales en contraste con la etapa de mantenimiento y conservación deberán controlar la fisuración que posiblemente se dé con el tiempo sobre la carpeta de rodadura. Sin embargo, el control del fisuramiento de la calzada es una actividad que debe ser esencial y constante en cualquier tipo de intervención o técnica usada para la rehabilitación a fin de evitar el debilitando de la estructura del pavimento y el paso del agua a las capas inferiores.

Finalmente, la propuesta de intervención al ser comparada con técnicas de rehabilitación tradicionales usadas en nuestro país; se comprueba que la técnica de reciclado y tratamiento con cemento, garantiza la prolongación de la vida útil a un costo razonable y reduce la huella de carbono en más del 60%.

Antecedentes

A nivel de todo el mundo y especialmente en los países de la Región de Latinoamérica, las carreteras están enfrentando un problema común: el aumento de los volúmenes de tráfico y las cargas por eje, y la disminución de la inversión real en carreteras, que incluye el mantenimiento y la rehabilitación de los pavimentos. Lo antes mencionado implica que las carreteras y la infraestructura vial, cumplan un papel fundamental en la calidad de vida de los ciudadanos, por lo que, urge dotarlas de mantenimiento utilizando tecnologías eficientes, económicas, ambientales y técnicas comprobadas que brinden igual o mejor calidad en cuanto a su durabilidad y eficiencia (OCDE/CAF/CEPAL, 2018).

Por lo tanto, en países desarrollados, como Australia y Nueva Zelanda, desde hace tiempo atrás, han implementado el reciclaje de los materiales, empezando con los materiales asfálticos y granulares que son mezclados con cemento; técnica que sigue siendo monitoreada. De igual forma, la técnica del reciclado ha llegado hasta reciclar el tóner de impresora (elemento que

sustituye a los cartuchos de tintas de impresión en máquinas láser), para post-consumo usar el polvo de dichos toners de impresión, como un polímero, que posee plástico, cera, minerales y pigmentación en su composición destinados a mantenimientos y construcción de pavimentos, de modo, que esta actividad permite la reducción de la producción y emisión de CO₂, de acuerdo a lo manifestado en Di Denis Venturi (2008)

En la investigación que efectúa Arteaga Villamarin (2018) en la cual, su objetivo principal es comparar el comportamiento de la base granular modificada con cemento, con base granular mezclado con el 2%, 4% y 6% de PET (pavimento fabricado con plástico procedente de botellas reciclado) tipo escamas No 4, como estabilizante, concluyo que el material PET presenta algunas propiedades como:

- Es muy estable e inerte
- Es fuerte y resistente al ataque de microorganismos
- No reacciona con diferentes sustancias y no se degrada biológicamente,
- Es un material liviano que se puede reciclar en un 100%

De manera que, el usar PET como una técnica de rehabilitación de pavimentos, se está convirtiendo en una manera de usar el plástico como un material amigable con el planeta, generando impactos ambientales positivos.

En los últimos años más gobiernos adoptan el reciclaje de pavimentos dentro de sus políticas de estado, desplegando la premisa de disminuir la utilización de materiales nuevos a objeto de conservar las condiciones ambientales (Restrepo Sierra & Stephens Zapata, 2015).

Dentro del reciclado de los materiales con cemento en Costa Rica hay una amplia experiencia acumulada en este campo, en donde indican que se pueden construir capas de base de alta capacidad estructural, muy competitivas en cuanto a durabilidad y estabilidad volumétrica a largo plazo. Desde el punto de vista constructivo, se recomienda analizar técnicamente los procesos constructivos para la combinación óptima del agua, el cemento y la energía de compactación ya que es fundamental lograr bases de alta calidad y excelente desempeño, minimizando de esta forma el agrietamiento por contracción de fraguado (Arce, 2011).

Según la investigación efectuada por Villacreses Salas (2014), en la que desarrolla el diseño de base granular estabilizada con cemento, empleando Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU fabricado por la empresa Holcim Ecuador S.A., concluye que el porcentaje de humedad óptima

es 5.8%, la cantidad de cemento que permite alcanzar una resistencia de 6.3MPa a los 7 días de edad. Por ende, con la dosificación planteada en esta investigación, se cumple con los parámetros de resistencia que estipula la especificación técnica ACI 230.1R (Report on Soil Cement) en donde se indica que la resistencia a la compresión debe ser al menos 6 MPa

Matute Acuario (2016) efectúa una comparación técnica económica entre una base granular para pavimentos versus una base estabilizada con cemento para una estructura de pavimento y concluye que una base estabilizada con cemento tiene muchas ventajas sobre una base granular, porque primero va a generar una mayor resistencia, y mejorar la capacidad portante de la estructura del pavimento, elevando su capacidad para resistir cargas dinámicas; De igual modo indica que económicamente es conveniente porque permite emplear materiales de la zona de trabajo sin la necesidad de importar materiales clasificados de canteras.

En términos ambientales Herra (2018) menciona que la implementación de bases estabilizadas con cemento representa una gran ventaja, ya que, al mejorar las propiedades mecánicas de un material, se reduce la necesidad de buscar y explotar fuentes de agregado de muy alta calidad.

En la presentación de Lazo Lázaro (2018) acerca de la evaluación del diseño de pavimentos estabilizados con emulsión asfáltica y cemento portland para el proyecto de conservación vial Puno Tacna tramo Tarata –Capazo –Mazocruzen, en una de sus hipótesis planteó que los agregados de cantera no siempre poseen mejores propiedades físicas y mecánicas que los de la plataforma existente, por lo que, ante la limitada disponibilidad de canteras, se recomienda estabilizar los materiales; por ende, a través de la investigación se logró para ambos escenarios (estabilización con cemento Portland con el 3% y la estabilización con emulsión asfáltica de 2%) coeficientes de aporte estructural de 0.16 y 0.24. Del mismo modo, en la misma investigación se indicó que en caso de haber usar 2% de cemento Portland, el coeficiente de aporte estructural sería de 0.13; valor que superó ligeramente la mitad del coeficiente de aporte estructural obtenido mediante la estabilización con 2% de emulsión asfáltica.

Bajo las distintas alternativas de rehabilitación que existen hoy en día, y sobre todo la tendencia de que en nuestra región se tiene accesibilidad a tratamientos que involucran el material cementante por la disponibilidad tecnológica y de producción de la materia prima (CEPAL, 1985). Se ha visto aplicable la factibilidad de desarrollar el trabajo de investigación de evaluación estructural y diseño de la rehabilitación del pavimento asfáltico, empleando una base asfáltica reciclada con cemento, en la carretera Macas – Sinaí, ubicada en la provincia de Morona

Santiago, ya que es una metodología conocida y que se ha puesto en práctica en distintos puntos del país. Además, que se han realiza los estudios previos sobre la efectividad.

1.2 Planteamiento del Problema

La red vial estatal del Ecuador son el conjunto de caminos principales de propiedad pública, las cuales son administradas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, quien es la Entidad Estatal responsable del manejo y control, de acuerdo al Decreto Ejecutivo 860, publicado en el Registro Oficial No. 186 del 18 de octubre de 2000.

La red vial Estatal esta categorizada como vías primarias y secundarias y se identifican por tener ser vías de alto tránsito vehicular, sobre todo de vehículos pesados ya que intercomunican a las capitales de provincia, cabeceras de cantón, los puertos de frontera internacional con o sin aduana y los grandes y medianos centros de actividad económica. La longitud total de la Red Vial Estatal (incluyendo vías primarias y secundarias) es de aproximadamente 9660 km de carretera.

En el año 2006 se efectuó el Plan Maestro de Vialidad efectuado por Gobierno Constitucional del Ecuador en donde uno de los objetivos propuestos fue el de establecer programas de conservación, consolidación, seguridad vial, optimización, monitoreo y evaluaciones periódicas de desempeño, así como impulsar el desarrollo tecnológico en el área de la vialidad y el transporte para el corto, mediano y largo plazo (Gobierno Constitucional del Ecuador, 2006), situación que hasta el año 2006 representó el 28% de la inversión total del Ente Rector.

De acuerdo a los reportes y rendición de cuentas que efectúa anualmente el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, por ejemplo, en el año 2017 se ejecutaron obras de mantenimiento periódico como recapeo y/o bacheo planificado cada cinco años en las que se invierten entre USD 600 y 1 500 mensuales por cada uno de los 9 997 kilómetros de vías estatales que tiene el país. Por lo que para todo el año se estima que se invirtió USD 86,32 millones. (Castillo, 2017). Posteriormente para el año 2018 se destinaron USD 109.2 millones para el mantenimiento correctivo y rutinario de 8.372,30 kilómetros de la Red Vial Estatal (RVE). Y luego desde el 2019 en adelante el Ministerio de Finanzas redujo la inversión pública del Plan Anual de Inversiones (PAI), con lo que se vio afectada las programaciones de los mantenimientos viales en la red estatal. (Guerra, 2020). De esta manera, las tareas de rehabilitación y reparaciones que se realizan diariamente en las vías es una tarea que implica inversiones sustanciales y decisiones

políticas, justamente por la reducción presupuestaria de los últimos años. Situación que afecta a la conservación vial, ya que, el desvincular los mantenimientos rutinarios y periódicos de un corredor, permite y facilita el deterioro acelerado y consecuentemente se pierde el patrimonio vial de nuestro país, que finalmente se traduce en los altos costos de operación, y serviciabilidad de los usuarios.

Por ejemplo, la carretera Macas – Sinaí, parte de la Troncal Amazónica E45 construida en el año 2008 fue un pavimento con un doble tratamiento superficial bituminoso DTSB, el cual fue rehabilitado en el año 2010 colocando una capa de rodadura de hormigón asfáltico de espesor de 5 cm. Desde ese año hasta la actualidad el tramo Macas – Sinaí no ha tenido un mantenimiento periódico adecuado para mantener un nivel de servicio óptimo, lo cual ha provocado la presencia de patologías en la capa de rodadura caracterizadas por fallas tipo piel de cocodrilo.

Tareas como limpieza de alcantarillas y cunetas se efectúan frecuentemente en el tramo vial de la presente investigación; sin embargo, esto no es suficiente, porque desde el año 2008 a la fecha, este tramo vial está aumentando el volumen de tránsito y comercialización de productos, por lo tanto, la demanda en la vía se ha visto evidenciada en el alto grado de deterioro superficial de la carpeta asfáltica, por ende, la Entidad debería efectuar otras actividades de mantenimiento que ataquen el verdadero conflicto.

De manera que, es fundamental mejorar la cultura preventiva para llevar una buena contabilidad sobre “los costos ocultos del limitado mantenimiento”, que pueden ser diversas, como, entre ellos: la temporal inversión en mantenimiento de infraestructura, por la falta de capacidad técnica y de gestión de la mayoría de entidades territoriales, ausencia de alternativas de recursos sostenibles para reparación-mantenimiento. Por esta razón, el presente trabajo plantea una alternativa de rehabilitación que permita reducir el impacto ambiental, las actividades de mantenimiento, optimice el uso de fuente de materiales y mejore el desempeño ante deformaciones y fatiga inducidas por las tensiones a las que está sometida la estructura de pavimento por el alto tráfico. De tal manera que les proporcione seguridad y confort a los usuarios.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo de investigación es evaluar estructuralmente y diseñar la rehabilitación del pavimento asfáltico, empleando una base asfáltica reciclada con cemento, en el Corredor E20, tramo Macas – Sinaí, ubicada en la Provincia de Morona Santiago.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar el paquete estructural existente de la carretera Macas – Sinaí.
2. Realizar el diseño de la base asfáltica estabilizada con cemento como metodología para la rehabilitación, para contribuir a la elección de alternativas de diseño de las obras de rehabilitación del pavimento.
3. Comparar la metodología de base asfáltica reciclada con cemento con la metodología tradicional, para determinar cuál es más adecuada desde el punto de vista económico y cual alternativa es más sostenible desde el punto de vista ambiental.

1.4 Metodología a desarrollar

Para el desarrollo de esta investigación se verificó previamente los métodos de análisis más confiables que existen a nivel internacional para la investigación y evaluación del comportamiento del pavimento. De esta manera el nivel de confiabilidad para el presente trabajo es de nivel 1 de acuerdo a la categorización efectuada por Sarango Cueva (2019). Por ende, la metodología efectuada en el desarrollo del presente trabajo es la siguiente:

1.4.1 Fase I: Reconocimiento del sitio

Constituye la parte esencial en donde se identificaron los modos y tipos de fallas encontrados en el pavimento, lo que ha permitido realizar una evaluación global del de la condición superficial, así como también se identificaron las fuentes de materiales aledañas al proyecto, zonas protegidas ambientalmente que circunden la zona, y la económica circundante en el alrededor.

1.4.2 Fase II: Desarrollo de las evaluaciones al pavimento

Dentro de la evaluación que se realizó al pavimento de la presente investigación, se subdividió los análisis en base de cada tipo de evaluación, las cuales se detalla a continuación:

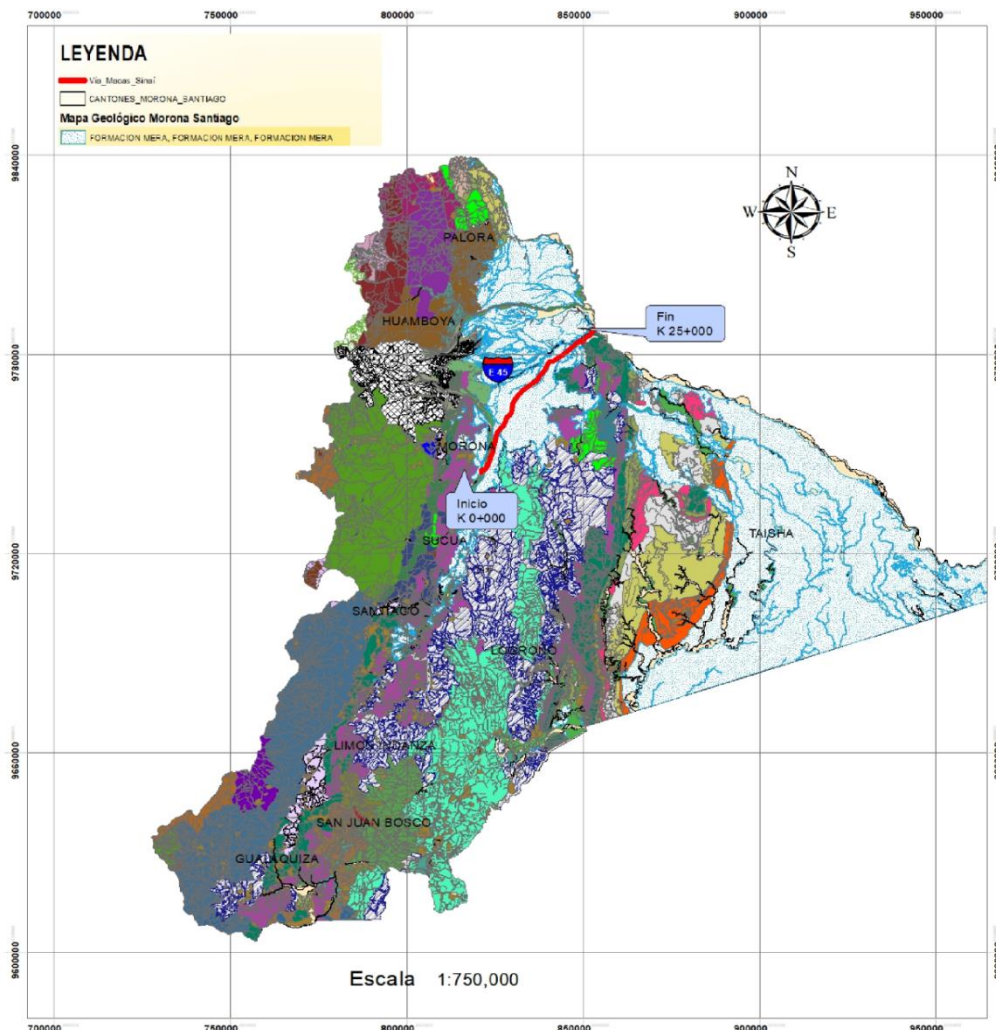
A. Evaluación funcional del pavimento

Esta evaluación consistió esencialmente en la determinación de la condición superficial en la que se identificaron las fallas de la superficie y su cuantificación, siguiendo la metodología VIZIR para la toma de datos y el procesamiento respectivo, cuyo procedimiento se detalla en el capítulo 0, numeral 2.1

B. Evaluación geotécnica del pavimento

Partiendo de datos generales, como mapas geológicos, cartas topográficas de la zona de influencia, se identificó la unidades geológicas y los estratos litológicos por donde se desarrolla el tramo vial, con el objetivo de facilitar la selección de secciones homogéneas, bajo las cuales se debía realizar la exploración del subsuelo a través de calicatas, encontrándose que el tramo vial atraviesa la una sola unidad geológica que es la Formación Mera (Figura 1). Lo que supondría una sola calicata para todo el corredor.

Figura 1: Mapa Geológico del área de estudio



Sin embargo, una calicata no permite la caracterización geotécnica del tramo investigado, por lo que se consideró la base de datos de la deflectometría realizada, de esta manera, de acuerdo a los datos deflectométricos se planificó la exploración sobre los sitios que mayor deflexión se encontró, lo que significó efectuar calicatas cada 5 km aproximadamente. Dichos sondeos contribuyeron a determinar las distintas capas que componen la estructura de pavimentos en el tramo Macas-Sianí. En esta actividad también se tomó muestras para verificar la condición granulométrica y características físicas-mecánicas de los materiales que componen cada capa de la estructura. Las exploraciones directas se realizaron sobre secciones de 1x1m² y profundidad referencial de 1,50 m hasta llegar a nivel de la subrasante, cumpliendo con la Norma ASTM D1883-73.

C. Evaluación y diagnóstico estructural del pavimento

La evaluación estructural se la efectuó usando el equipo FWD (deflectómetro de impacto) marca PRI-2000 de Dynatest, dispositivo de carga dinámica remolcado por un vehículo, que cumple todos los requisitos estandarizados por la ASTM D 4694-96 y el protocolo de calibración de SHRP para equipos de este tipo, con el fin de obtener claramente la condición estructural, determinar las características materiales in situ de las capas de pavimento, determinar la vida residual y las alternativas de diseño de pavimentos para el horizonte del proyecto.

1.4.3 Fase III: Análisis e Interpretación de datos

En esta fase se realiza el análisis e interpretación de resultados, considerando que se ha determinado las secciones homogéneas, la evaluación cualitativa de los materiales, el cálculo de ejes equivalentes de la sollicitación en el periodo de diseño, en donde se realiza el análisis técnico, económico y ambiental de la alternativa de rehabilitación elegida.

1.4.4 Fase IV: Conclusiones y Recomendaciones del trabajo

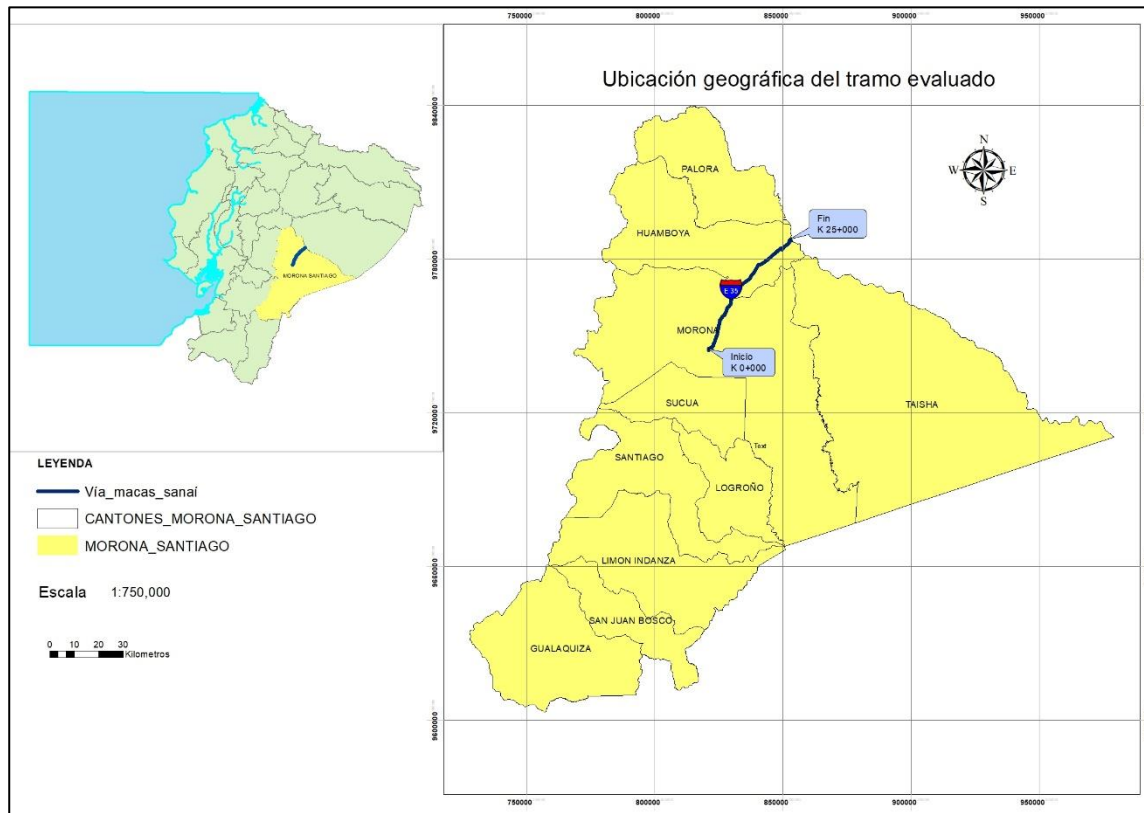
Las conclusiones que se presentan reflejan el aportan y las reflexiones a las que se ha llegado sobre los objetivos planteados.

1.5 Zona de ubicación y área de influencia

1.5.1 Demarcación geográfica

Ubicado en la Región Amazónica, al sur del país, en el corredor vial E45 que conecta las provincias de Sucumbíos, Napo, Pastaza, Morona Santiago, Zamora Chinchipe y Bolívar y es considerado uno de los ejes comerciales más importantes del Ecuador, por su desarrollo económico en la industria, ganadería, agricultura y turismo. La zona en estudio se sitúa específicamente en el tramo Macas – Sinaí, con una longitud cercana a los 25km.

Figura 2: Mapa de Ubicación del área de estudio

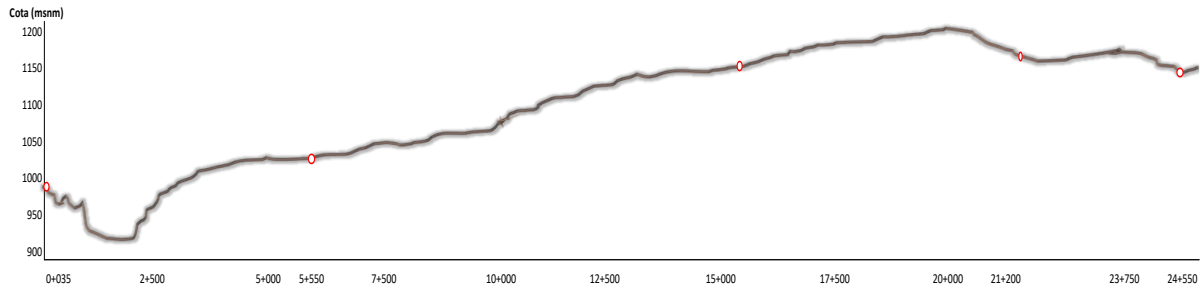


Nota: El tramo Macas-Sinaí es parte del corredor E45

1.5.2 Descripción del corredor vial

El tramo vial objeto de estudio, comprendido entre la ciudad de Macas (K0+000) y el ingreso a la población de Sinaí (K25+000) con una longitud aproximada de 25km, se desarrolla en una topografía ondulada a montañosa, lo que genera secciones de la carretera con cortes de poca altura o a nivel del terreno, tal como se puede apreciar en las siguientes fotografías:

Linealmente, la carretera abarca diferentes alturas a nivel del mar, desde los 922 m.s.n.m hasta sectores a 1200 m.s.n.m (Ver Figura 3), conformada por una doble calzada, un carril por sentido de circulación, cuyo ancho total promedio es de 9.80m, con una estructura en pavimento flexible.

Figura 3: Perfil de Elevación del tramo Macas-Sinaí

Nota: Tomado de Google Earth, 2020

1.5.3 Clima

La temperatura ambiente de la zona presenta variaciones significativas durante el transcurso del año, registrándose como temperatura mínima 7°C y una máxima de 15°C, junto a un promedio anual que oscila entre 14.5°C, según lo establecido por el INAMHI – Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología en su boletín climatológico anual (2019). La baja temperatura y gran variación diurna en la temperatura en comparación con la variación estacional son las características más destacadas de los climas de las altas montañas tropicales.

En función de la elevación de la zona objeto de estudio (entre los 922msnm y 1200 msnm), el clima es templado cálido. La lluvia cae todos los meses del año. La temperatura media anual en Macas es 16° y la precipitación media anual es 1626 mm. No llueve durante 28 días por año, la humedad media es del 86% y el Índice UV es 4. (INAMHI, SENAGUA, 2017).

El clima en que se desenvuelve la zona de estudio tiene influencia directa en el comportamiento del pavimento porque existe un mayor desgaste a la fatiga de la mezcla asfáltica, producida entre muchos factores por la disminución de la temperatura. Por eso, en el capítulo 0 se realiza los análisis y reflexiones para considerar aditivos que permitan mejorar el comportamiento del pavimento y se evite el aumento de rigidez que conllevaría a la fisuración temprana de la superficie.

1.5.4 Reseña de la construcción del proyecto

Hace años, la ciudad de Macas se conectaba con el resto del país mediante vías que se encontraban en muy mal estado, que dificultaba el acceso, es así que el tramo Puente Pastaza – Macas, tramo de la Red Estatal de la Troncal Amazónica, era un verdadero peligro para

conductores y peatones; La primera construcción a nivel de un doble tratamiento superficial bituminoso fue desarrollada por la empresa Hidrobo Estrada S.A. en el año 2008, construyendo un paquete estructural constituido por mejoramiento, sub base, y base para luego colocar un DTSB. Posteriormente este tramo fue intervenido por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército en el año 2010, colocando una capa de rodadura de hormigón asfáltico de espesor de 5 cm. Desde el 2010 hasta la actualidad el tramo Macas – Sinaí no ha tenido un mantenimiento periódico adecuado para mantener un nivel de servicio óptimo, lo cual ha provocado la presencia de patologías en la capa de rodadura.

1.6 Marco Conceptual

1.6.1 Conservación vial

La conservación es el cuidado de la carretera, y toda su infraestructura vial, en la que se prevé que conserve las características geométricas y estructurales especificadas en el diseño y construcción originales. El objetivo del mantenimiento de pavimentos es preservar, reparar o restaurar una calzada y mantenerla en condiciones de uso seguro, favorable y económico. (Moreno Ponce , y otros, 2018)

Dentro de la conservación vial existe el mantenimiento, el cual se subdivide en:

Mantenimiento rutinario consiste en reparar defectos de magnitud baja a nivel de superficie, a veces nivelación de la misma y de los espaldones; mantenimiento regular de los sistemas de drenaje, de los taludes laterales y otros elementos de la vía. Se aplica con regularidad una o más veces al año, dependiendo de las condiciones específicas de la vía (Navarro Batallas , 2016).

Mantenimiento periódico de carácter preventivo y planificado que se efectúa para conservar las propiedades y capacidades funcionales de la estructura de pavimento y su capa de rodadura; en esta planificación se modifica o sustituye total o parcial, dependiendo de la durabilidad de sus elementos componentes (Navarro Batallas , 2016).

1.6.2 Evaluación de pavimentos en servicio y diseño de obras de mejoramiento

En gran parte de sistemas de conservación vial, la decisión de la intervención en la carretera en la mayoría de casos se lo efectúa a través de la intuición y experiencia humana, que por sí sola

está sujeta a la subjetividad e incertidumbre. En tal virtud, hoy en día se hace necesario acudir a técnicas y herramientas que asisten y optimizar el proceso, porque se analizan factores multicriterio, entre ellos: la diversidad de alternativas de solución que existen, el costo de los errores que se puedan cometer y la rapidez que se requiere en las decisiones (Beltrán Calvo & Romo Organista , 2013).

Con la evaluación del pavimento se espera que los resultados de auscultación reflejen de manera confiable las respuestas, el comportamiento y el desempeño real del pavimento, y que además permita caracterizar rápidamente un corredor vial, con los niveles de detalle que se requieran: punto a punto o globales por sector.

Cuando los pavimentos presentan condiciones de deterioro, por distintas causas, esas condiciones pueden ser evaluadas con evaluación funcional y estructural.

Evaluación funcional. - Son las inspecciones rutinarias de deterioro que permiten verificar el desempeño funcional del pavimento y que ayudan a predecir la condición del pavimento para tomar acciones en el desarrollo del programa de mantenimiento rutinario. Las distintas técnicas de evaluación se clasifican dependiendo de los beneficios técnicos y gastos administrativos que se requiere, es decir, en agencias medianas se efectúan auscultaciones visuales, las cuales son realizadas por un inspector, lo que significa recolección de datos de pavimento de la condición superficial con menores gastos administrativos. Normalmente en una carretera en la superficie se mide:

- Deterioro superficial
- Regularidad superficial
- Resistencia al deslizamiento
- Medición del ruido en el contacto neumático

Dentro de las evaluaciones de tipo funcional que se realizan en la carpeta asfáltica se emplean distintos métodos y equipos como los que se muestran en la fotografía 11, donde esta data aporta a la Entidad para un óptimo manejo de los Sistemas de Administración de Pavimentos.

Figura 4: Evaluación funcional de pavimentos con determinación de deterioro superficial, regularidad superficial, resistencia al deslizamiento y medición del ruido.



Nota: Fotografía extraída de Dirección Nacional de Vialidad de Argentina (2016). Evaluación de pavimentos. <https://misionesonline.net/2016/04/05/vialidad-inicia-hoy-evaluacion-de-pavimentos-en-misiones/>

El determinar el deterioro superficial se lo efectúa con un levantamiento de inventario de daños visual, que se registra en un block de notas con el objeto de que el interventor establezca un juicio apropiado sobre la condición del pavimento global del pavimento.

La clasificación y cuantificación de los deterioros de un pavimento asfáltico se la verifica por distintas metodologías entre las más conocidas están la VIZIR y PCI. Estas metodologías complementan la evaluación del pavimento, las cuales tienen reconocimiento a nivel internacional sobre los Sistemas de Administración para el mantenimiento y cuidado de las carpetas asfálticas, de esta manera, un método de evaluación del comportamiento del pavimento es el PCI (Pavement Condition Index), el cual permite inspeccionar la condición superficial del pavimento y a través de esta metodología de realizar relevamiento visual de las fallas superficiales y de esta manera determinar el estado en que se encuentra un proyecto o red vial, tomando en consideración la normativa ASTM D6433-03

Dentro de las metodologías para inventariar daños superficiales del pavimento se encuentra la metodología VIZIR (Metodología de auscultación francesa) que actualmente es utilizada por los países de la región como Colombia y se encuentra dentro de la normativa INVIAS, por consiguiente, dada las cualidades físicas, topográficas y climáticas de semejanza con nuestras carreteras, esta metodología puede ser aplicada en nuestro país, como parte de un sistema de monitoreo y complemento para elaborar el plan y programa de mantenimiento vial (Rodríguez Velásquez, 2009).

Según Vasques Varela, (2002) la metodología del PCI (Índice de Condición del Pavimento) tiene como objetivo evaluar la condición superficial de un pavimento ya sea este flexible o rígido. De esta forma, el PCI es un índice adimensional y numérico que va desde (0) indicando que el pavimento está fallado o en mal estado, hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado. De igual forma está el método VIZIR que clasifica los deterioros de los pavimentos asfálticos en dos categorías, A y B. Los deterioros del tipo A identifican la condición estructural del pavimento que está ligada a las condiciones de las diversas capas del pavimento y el suelo de subrasante o, simplemente, a las capas asfálticas. Estas condiciones muestran fallas que evidencian insuficiencia en la capacidad estructural de la calzada, cuya descripción visual requiere ser validada con conocimiento de causa y debe complementarse con criterios de valoración de evaluación estructural (ensayos de resistencia o de respuesta, deflexiones, etc.). Estos deterioros revelan deformaciones y fisuración que tiene estrecha relación a la fatiga del pavimento.

Por otro lado, están las fallas que se identifican de tipo B, y que en la mayoría de caso son de carácter funcional, las cuales no están ligadas a la capacidad estructural del pavimento. Las causas pueden ser variadas, entre ellas las deficiencias constructivas y/o localizadas en sitios que los usuarios pueden evidenciarlas muy fácilmente. Los deterioros del tipo B son fisuramientos motivados por asuntos distintos a la fatiga, los desprendimientos, baches y los afloramientos.

Cuando se realiza el tratamiento de los datos de campo se obtiene un valor de I_s que es el índice de serviciabilidad del pavimento el cual va de 1 a 7, bajo lo cual se debe tomar como referencia la tabla 2 que se menciona a continuación.

Tabla 2: Rango de Is según metodología Vizir

Rango del Índice	Estado del pavimento	Trabajos de mantenimiento requeridos
1-2	Buen estado	Pavimentos con limitados agrietamientos y deformaciones que presentan un buen aspecto general y que no requieren en el momento más que acciones de mantenimiento rutinario
3-4	Regular estado	Representan pavimentos con agrietamientos estructural
5-7	Pavimentos altamente deteriorados	Son pavimentos con agrietamientos y deformaciones abundantes, cuyo deficiente estado superficial

Nota: Tomado de Ballesteros Santos y Benavides Ladino, 2021. Ballesteros Santos, L., & Benavides Ladino, Y. (14 de 09 de 2021). Evaluación y análisis de deterioros en pavimentos asfálticos mediante la metodología VIZIR – INVIAS 2013 sobre el tramo k5+000 al k 7+000 de la vía los Municipios de Melgar-Icononzo (Tolima). Proyecto para exhibir y obtener el diploma de Ingeniero Civil. (U. P. Magdalena, Ed.) Giradot, Cundinamarca, Colombia. Obtenido de <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5699/EVALUACI%C3%93N%20Y%20CLASIFICACI%C3%93N%20DE%20DETERIOROS%20EN%20PAVIMENTOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y> en Toledo (2020)

Regularidad superficial es una medida del comportamiento funcional de un pavimento, a través de la que se mide mayor o menor comodidad en la circulación. Se puede definir como el conjunto de efectos causados en los vehículos por las variaciones en el perfil longitudinal real de la calzada, respecto del teórico del proyecto. Por ejemplo, las irregularidades de la superficie del pavimento propician aceleraciones verticales a los vehículos en movimiento y hacen que la circulación se vuelva incómoda, insegura y antieconómica.

Resistencia al deslizamiento, también denominada fricción superficial, es la fuerza desarrollada en la interfaz neumático-pavimento, que resiste el deslizamiento del neumático cuando se aplican los frenos al vehículo. Esta es la principal propiedad del pavimento en lo que se refiere a seguridad, aparte de los factores relacionados con las condiciones geométricas de la vía.

Medición del ruido en el contacto neumático, de acuerdo a lo que indica la Organización Mundial de la Salud desde 1979 definió que el ruido es una problemática ambiental.

1.6.2.1 Tipos de fallas sobre el pavimento

Tipos de fallas en el pavimento flexible que pueden encontrarse muy comúnmente en las carreteras estatales del Ecuador (Ministero de Obras Públicas de República Dominicana).

Parqueo y Bacheo. - Entendido como los hoyos de una zona localizada severamente desgastada.

Figura 5: Baches según la severidad



Perdida de agregado. - son cavidades pequeñas o peladuras que suelen acompañar los desprendimientos. Se desarrollan por disgregación. Se desarrollan por disgregación de las partículas más gruesas, localmente.

Figura 6: Pérdida de agregado y/o peladura de la superficie



Ahuellamiento. - son huellas canalizadas de las ruedas de los vehículos más pesados y es una depresión evidente por la incapacidad estructural del pavimento.

Figura 7: Ahuellamiento según nivel de severidad



Grietas longitudinales por fatiga. - son grietas que se inician en el borde inferior de las capas asfálticas, donde los esfuerzos de tracción son máximos, y se manifiestan en la huella de tránsito.

Figura 8: Grietas longitudinales según nivel de severidad



Grietas por contracción térmica. - Fisuras y grietas interconectadas que dividen la superficie del pavimento en polígonos aproximadamente rectangulares. El tamaño de los bloques varían en un rango de alrededor de 0.9m² hasta un máximo de 9m². Cuando los bloques resultan de mayor tamaño son identificados generalmente como fisuras longitudinales y transversales. Las fisuras en bloques se diferencian de las fisuras tipo piel de cocodrilo en cuanto a que en estas los polígonos son más pequeños, irregulares y de ángulo agudo, y se originan por excesiva contracción de la mezcla asfáltica inducida por cambios de temperatura y/o humedad en la misma.

Figura 9: Fisuras en bloque según nivel de severidad



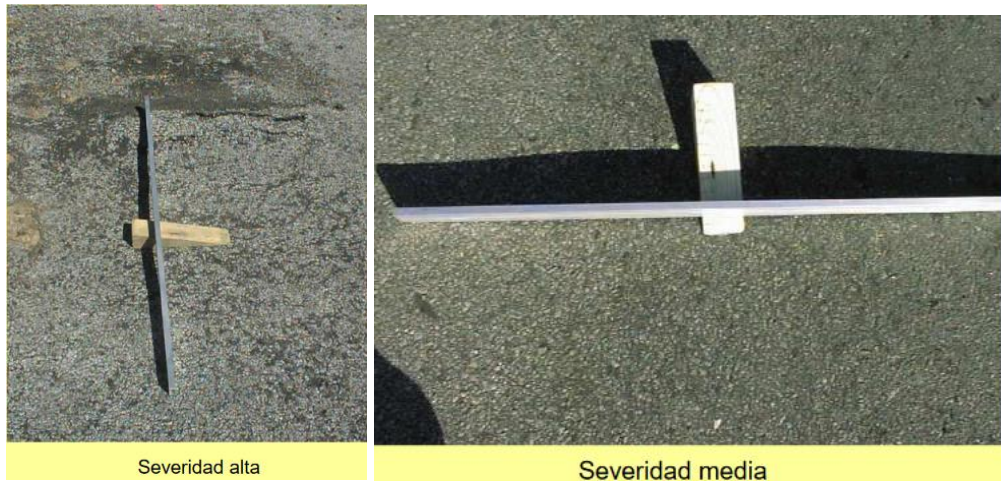
Piel de cocodrilo. - Serie fisuras interconectadas entre sí, formando en la superficie del pavimento pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos y dimensión mayor normalmente inferior de 0.30 m. Fenómeno asociado a las repeticiones de carga (fatiga), estas fisuras ocurren solo en áreas expuesta a las sollicitaciones del tránsito (principalmente huellas de canalización); por ende, raramente cubren toda el área del pavimento.

Figura 10: Piel de cocodrilo según nivel de severidad



Hundimiento. - Depresión o descenso de la superficie original del pavimento en un área localizada del mismo. Pueden ocurrir en los bordes o internamente en la calzada. En muchos casos las depresiones son difíciles de detectar, sino es durante luego de una lluvia, por la acumulación de agua o vestigios de humedad. En otros da lugar a distorsiones apreciables, de gran longitud de onda o, por el contrario, abrupto y localizado.

Figura 11: Hundimiento según nivel de severidad



Evaluación estructural para evaluar la condición estructural de un pavimento se pueden recurrir a dos métodos distintos, el primero es llevar a cabo pruebas de laboratorio de los materiales, y la segundo realizar pruebas no destructivas (NDT, por sus siglas en inglés).

Pruebas en Laboratorio con este método se deben hacer calicatas y extraer muestras para ensayar en laboratorio y obtener los parámetros físicos y mecánicos, sin embargo, implica invertir mucho tiempo y esfuerzo; además, es destructivo ya que las muestras se hacen directamente en la carretera, que podría afectar el tránsito y la seguridad de los usuarios.

Figura 12: Exploración de materiales en el pavimento



Nota: Extraído del Diario digital de Vozperu (2017). Estudio para la Rehabilitación de la Av. Mariscal.

Mediciones no destructivas que consiste en tomar mediciones en la superficie del pavimento y a partir de esto inferir sus condiciones estructurales, en cualquier momento de la vida útil del pavimento sin provocar daños funcionales o estructurales a la vía. Bajo este escenario se mide la deflexión con diversos NDT, como el deflectómetro de impacto (FWD) que provee un cuenco de deflexión realista que puede utilizarse para el diseño mecanicista-empírico (Ali & Khosla, 1987), el cual se puede observar en la fotografía siguiente.

Figura 13: Toma de datos deflectométricos del pavimento con FWD



Nota: El Primax 2000, equipo perteneciente al Laboratorio de Suelos y Asfaltos del MTOP es con el que se realiza la evaluación estructural del corredor Macas-Entrada a Sináí

1.6.3 Técnicas de rehabilitación de pavimentos flexibles

La rehabilitación de pavimentos asfálticos se continúa haciendo con los equipos de construcción tales como tractores, moto conformadoras, compactadoras, plantas de mezcla asfáltica, etc. Las nuevas técnicas han permitido incorporar nuevos equipos que permiten el reaprovechamiento de las mezclas asfálticas existentes en el camino, y estas son las despavimentadoras o fresadoras y las plantas de mezcla asfáltica para reciclado (Marchan Moreno, 2005).

Entre las técnicas tradicionales en términos generales se efectúan trabajos como (Marchan Moreno, 2005):

1. Relleno de grietas.
2. Renivelación
3. Bacheo
4. Riego de sello
5. Construcción de nuevas carpetas asfálticas

Existen técnicas de rehabilitación que permiten la sostenibilidad de los materiales como:

1. Incorporación de materiales reciclados.
2. Nuevos bio-materiales (bio-ligantes, bio-modificadores, etc.).

3. Materiales más durables y con capacidad de auto-reparación como asfalto caucho.
4. Mezclas frías, mezclas tibias y otras que disminuyen las emisiones al ambiente durante la producción.
5. Tratamientos superficiales de alto desempeño

1.6.4 Reciclaje de pavimentos flexibles

El reciclado de los pavimentos asfálticos ha resultado ser un método muy útil en la actualidad, ya sea realizado in situ o en planta (móviles o fijas). El reciclado, o llamado RAP ofrece un nuevo enfoque a la rehabilitación.

Para reutilizar el material se pueden utilizar técnicas mecánicas que pueden ser la mezcla de dos o más tipos de material o la adición de gravas o arenas y se pueden emplear diversos tipos de aditivos los más utilizados son el cemento, la cal y la emulsión asfáltica.

Cuando se recicla pavimentos asfálticos, la disgregación del material se mezcla con ligantes y/o agua, para luego extender y compactar. Por otro lado, la técnica elegida para la demolición de los viejos pavimentos asfálticos tiene gran influencia sobre la calidad final del material reciclado que es:

- Reciclado en planta y en caliente
- Reciclado in situ y con mezcla en caliente
- Reciclado in situ y en frío.

Dentro de los reciclados en frío y en in situ son los más usuales, como ligante a base de emulsión o como conglomerante el cemento (Huang & Benedetto, 2015).

Materiales asfálticos reciclado y estabilizados con cemento se logra la estabilización de un material cuando se agrega el cemento, el agua y la energía de compactación dicho material que aumenta sus propiedades de resistencia mecánica, de plasticidad, y es sólido ante los procesos de meteorización bajo las condiciones de clima al que está expuesto en el pavimento (Arce, 2011).

La estabilización por lo general se da en los materiales reciclados porque se pretende que una vez mejoradas sus características cumplan con las especificaciones requeridas por la obra y con el objeto de alargar la vida útil. Por ello, las ventajas de esta estabilización son:

Ventajas medioambientales

- Evita explotar nuevos yacimientos y disminuye la necesidad de desalojos
- La eliminación del transporte de los materiales disminuye las emisiones de CO₂ y la reducción de los combustibles y aceites, así como los impactos colaterales (polvo, erosiones y otros) que provoca sobre las carreteras y sus entornos.
- Eliminación de las emisiones de vapores nocivos.

Ventajas técnicas

- Puede ser usada con materiales de sitio reduciendo la energía de producción
- Mejorar las características físico – mecánicas como: elevar la capacidad de soporte, disminuir tensiones que llegan a las capas de mezcla asfáltica, con lo que aumenta la vida residual.

Ventajas económicas

- Se suprimen los costos por transporte, que muchas veces suponen importantes incrementos en los costos de los presupuestos.
- Disminuye el movimiento de tierras.

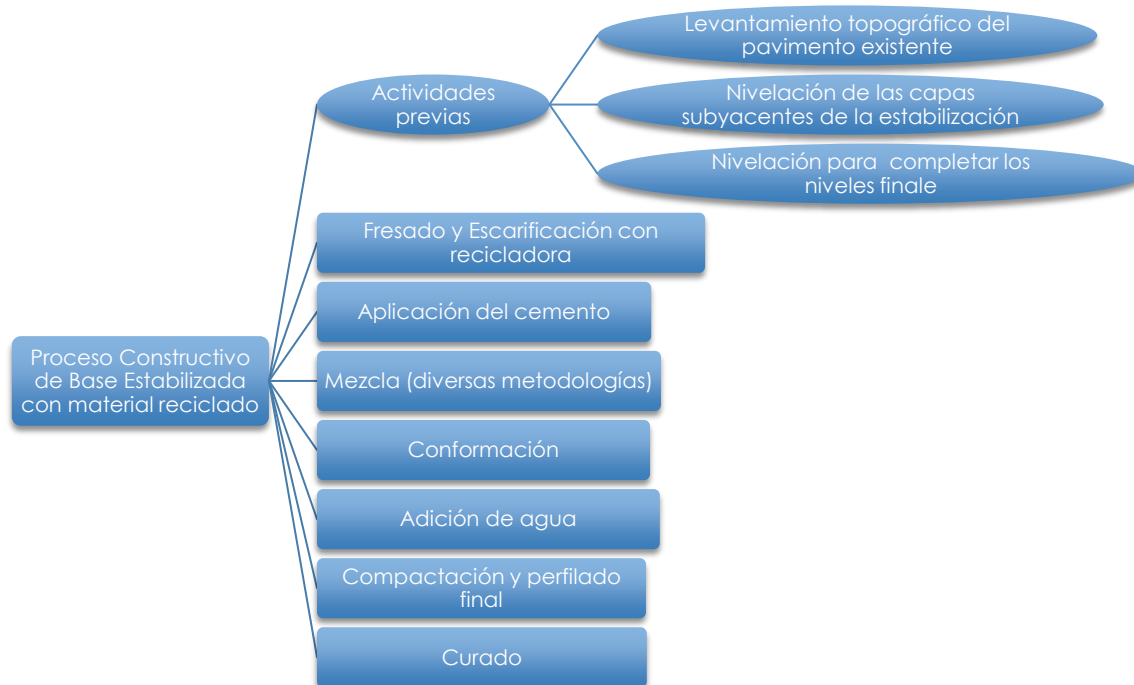
Limitaciones

- En algunos casos se puede tener elevados contenidos de sulfatos solubles (por encima del 1% se puede formar etringita muy expansiva).

Procedimientos constructivos de bases estabilizadas

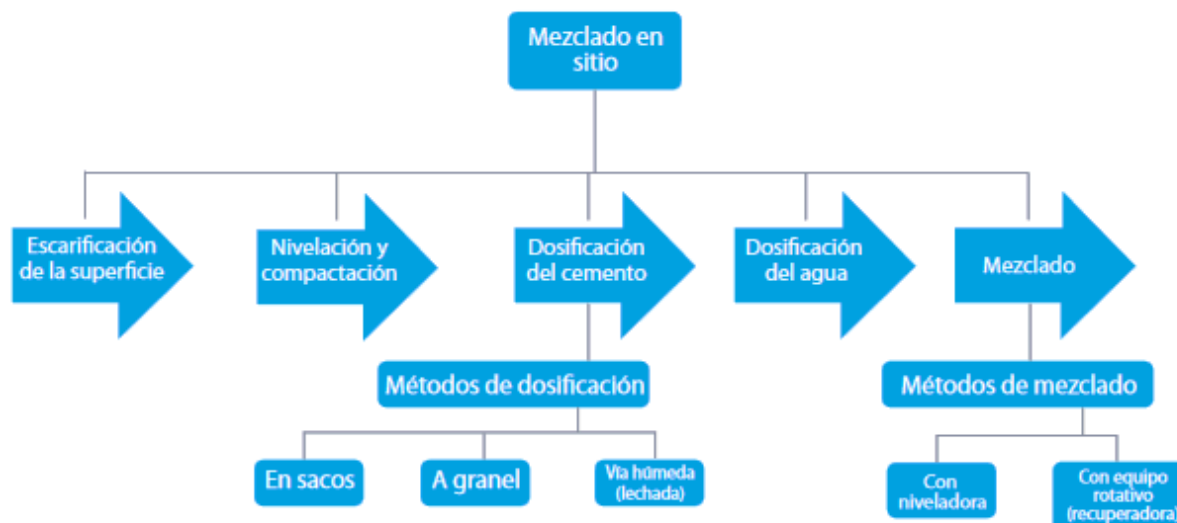
Tomando parte de la guía para inspectores para la construcción de bases estabilizadas con cemento desarrollada por LanammeUCR, se presenta el siguiente procedimiento constructivo para construir bases estabilizadas (Herra-Gómez, y otros, 2019).

Figura 14: Proceso Constructivo de Base Estabilizada con cemento en materiales reciclados



Cabe señalar que la actividad de mezcla es un paso clave en la construcción de estas capas estabilizadas, el cual compone la escarificación o recuperación de la superficie, nivelación, dosificación del cemento, dosificación del agua y mezclado, como se muestra en el siguiente esquema.

Figura 15: Esquema de Mezclado en sitio



Nota: La figura es extraído de Herra-Gómez, y otros 2019. Guía para inspectores para la construcción de bases estabilizadas con cemento.
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1435>

Capítulo II: Evaluación Y Análisis Del Tramo Vial en Estudio

La evaluación del pavimento realizada al tramo Macas-Sinaí tuvo como propósito estudiar el estado funcional y estructural del pavimento, de los cuales se obtuvieron datos para determinar el nivel de servicio que la rasante otorga al usuario y la capacidad estructural de soportar la demanda de cargas durante un periodo de su vida útil, para finalmente delimitar el tipo y nivel de rehabilitación requerido para el pavimento.

Para el desarrollo de este capítulo se utilizó algunas herramientas con la ayuda de equipos de auscultación y diagnóstico, cuyo procedimiento se describirá a continuación.

2.1 Evaluación funcional

Este apartado permite cuantificar la condición superficial del pavimento, utilizando herramientas que permiten verificar y medir la serviciabilidad del pavimento y sus patologías con inspecciones visuales en donde se identificó las fallas del pavimento y el análisis de las posibles causas y sus efectos.

Dentro de esta evaluación como una condición general del inspeccionado se encontraron fallas como fisuras, desprendimientos de agregado, baches, hundimientos y deformaciones.

En la presente investigación se aplicó la metodología VIZIR, en donde se usa un inventario de fallas sobre el pavimento efectuando una división de unidades de muestra que se realiza previamente en gabinete, para a continuación realizar el procedimiento de ir a campo para medir y evaluar el pavimento. En este proceso se identificaron los daños teniendo en cuenta su clase, severidad y extensión de cada uno de ellos. Una segunda fase que será el cálculo de cada una de las fallas.

Para la evaluación de pavimentos, el tipo de deterioro o falla está relacionada con el tipo de degradación que se presenta en la superficie de un pavimento entre las que tenemos piel de cocodrilo, exudación, grietas de contracción térmica, abultamientos, bacheos, entre otros, cada uno de ellos se describe en el Manual de Daños de la Evaluación de la Condición de Pavimentos. La gravedad, representa el nivel de severidad del deterioro en términos de su progresión; entre más severo sea el deterioro, más importantes deberán ser las medidas para su corrección, y la extensión se refirió al área o longitud del tramo evaluado que es afectado por un tipo de deterioro (Intituto Nacional de Vias, 2008).

Por lo antes mencionado se tomó como guía el Instructivo para la inspección visual y la evaluación de los deterioros de los pavimentos asfálticos de carreteras realizada por el Instituto Nacional de Vías de Colombia.

2.1.1 Aplicación del levantamiento de información de inspección visual

A continuación, se describirá la aplicación de la metodología VIZIR.

Método VIZIR.- utilizada como primer elemento para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. El procedimiento de aplicación es el siguiente (Ballesteros Santos & Benavides Ladino, 2021).

1. Se divide la vía en secciones o “unidades de muestreo”, cuyo muestreo se lo efectúa en base a lo enunciado por Ing. Vásquez Varela (2002) y para calcular el número de unidades depende de la división de la longitud total sobre la longitud del tramo, que para el presente caso se ha tomado como referencia un área de muestreo 230 ± 93 , como área máxima recomendada.
2. Luego se dividirá la longitud del sobre el área de muestreo adoptada como máxima sobre el ancho de la vía que equivale a 50m.
3. A continuación, se determinará el número total de tramos fragmentando la longitud total del tramo vía (25km) frente a la longitud de la muestra (50 m).
4. Y finalmente, el número mínimo de unidades de muestreo (n) que deben ser encuestadas dentro de una sección (50m), se lo realizó utilizando la siguiente fórmula y redondeando al siguiente número entero más alto.

$$n = \frac{N*s^2}{\left(\left(\frac{e^2}{4}\right)(N-1)+s^2\right)} \quad \text{Ecuación 1}$$

e = Error aceptable en la estimación de la sección; y e = ± 5 .

s = Desviación estándar de una unidad de muestra a otro dentro de la sección.

Esta fórmula permite obtener una estimación estadísticamente adecuada (95% de confianza).

5. La desviación estándar es de 10 para los pavimentos de hormigón asfáltico y de 15 para los pavimentos de hormigón hidráulico.

N = Número total de unidades de muestra en la sección

6. Luego de determinar las unidades de muestreo mínimas para la inspección, se debe calcular el intervalo de espaciamiento de las unidades mediante muestreo aleatorio sistemático, las cuales deben espaciarse en igual proporción en toda la sección. Este intervalo ($i \approx 5$ tramos) se calcula con la siguiente fórmula (Guaranda Mero, 2017).

$$i = \frac{N}{n} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

N = número total de unidades de muestra en la sección (Garcés V., 2017).

n = número de unidades de muestra a inspeccionar (Garcés V., 2017).

La primera unidad de muestra a inspeccionar se selecciona al azar de las unidades de muestra 1 a i (Garcés V., 2017).

Finalmente se recalcula el número de muestras corregidas con la siguiente fórmula

$$n = \frac{N}{i}, \text{ cuyas muestras a evaluar fueron 12 unidades}$$

7. Seguidamente se identificó y marcó la progresiva con número la siguiente nomenclatura: PR 00+000 al PR 0+050.
8. En el formato (ver Figura 16) se registrará la medición y clasificación de los parámetros que se levantará en cada unidad de muestreo.

2.1.2 Determinación de las unidades de muestra para la evaluación

Para poder realizar la división de las unidades de muestra se tomó en base al ancho de calzada, indicado en la siguiente tabla; de igual modo se toma en cuenta lo enunciado por Vásquez Varela (2002) en donde se indica que el área de la muestra debe estar entre 230 ± 93 metros cuadrados.

De esta manera se seleccionó la longitud de la vía de estudio para que la muestra sea representativa a lo largo de los 25 Km, de lo cual, se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 3: División de unidades de muestra

Descripción	Cantidad y Unidad
Longitud total de la vía	25000 m
Ancho de calzada	5.0 m
Ancho de carril	3.8 m
Longitud de la muestra	50.0 m

Se ha adoptado una longitud de muestra de 50.00m, debido a que el ancho de calzada es de 5.0m (sin incluir espaldón) esto da un área de 250.0 m². Para la obtención de número total de muestras, se divide la longitud total de la vía entre la longitud de la muestra, dando como resultado 500 unidades; a este valor se lo multiplica por el 10% que será un muestreo a nivel de red para conocer la condición general del corredor de estudio, quedando que el número total de unidades de muestra (N) sea igual a 50.

Aplicando la ecuación 1, se calcula las unidades a ser evaluadas, se adoptó un error e = 5% y una desviación estándar de $\sigma = 10$.

Previo a tomar en campo el relevamiento del inventario de daños, se debe esquematizar el muestreo de las unidades y la ubicación de donde se debe tomar los datos de fallas en el tramo de estudio. En consecuencia, en el siguiente cuadro se muestra las unidades de muestreo que se inspeccionaron.

Figura 16: Esquema de las unidades de muestreo a ser evaluadas

UNIDADES DE MUESTREO	
Longitud tramo	25000 m
Ancho carretera	10,00 m
Ancho carril	5,00 m
Longitud unidades	50,0 m
Unidades de muestreo	500
Unidades a inspeccionar	50
INTERVALO DE MUESTREO	
i =	10 unidades

Por consiguiente, la figura 16, denota que la primera unidad de muestreo sería desde la abscisa 0+000 a la 0+050, seguidamente se depone el relevamiento en el intervalo de 10 unidades (0+050 a 0+100, 0+100 a 0+150, 0+150 a 0+200, 0+200 a 0+250... 0+450 a 0+500), y se tomará el relevamiento en la abscisa 0+500 a 0+550, y así continuamente hasta levanta la última unidad en la abscisa 25+000 a 25+050.

2.1.3 Levantamiento visual de daños en el pavimento.

El relevamiento de inspección sobre los pavimentos con superficies de asfalto es una metodología que complementa la evaluación de pavimentos que se realizan los Sistemas de Administración vial en la gestión, en el cual, los resultados permitirán tomar decisiones acertadas sobre el plan de mantenimiento y conservación efectiva para la red vial analizada. Para la presente investigación se aplicó la metodología VIZIR porque la red vial de nuestro país tiene características similares a las de Colombia donde ampliamente se aplica este sistema como parte del sistema de evaluación de pavimentos, la misma que se realiza llenando los espacios en blanco en los formatos correspondientes de la Normativa del Instituto Nacional de Vías de Colombia, Formato B1 de la Figura 17. Registro de deterioros en pavimentos flexibles. A continuación, se muestra los tipos de deterioro que se tomaron en cuenta para levantar la información de pavimentos con superficies de asfalto.

Tabla 4: Nivel de los deterioros en pavimentos asfálticos para carreteras tipo A

NIVEL DE DETERIORO TIPO A			
DETERIORO	NIVEL DE GRAVEDAD		
	1	2	3
Ahuellamiento u otras deformaciones	Sensible al usuario pero poco importante Flecha < 20mm	Deformaciones importantes, hundimientos localizados o ahuellamiento 20 mm ≤ Flecha ≤ 40 mm	Deformaciones que afectan de manera importante la comodidad y seguridad de los usuarios Flecha > 40 mm
Grietas Longitudinales por fatiga	Fisuras finas en la banda de rodamiento	Fisuras abiertas y a menudo ramificadas	Fisuras muy ramificadas y/o muy abiertas (grietas). Bordes de fisuras ocasionalmente degradados
Piel de cocodrilo	Piel de cocodrilo formada por mallas grandes (>500mm) con fisuración fina, sin pérdida de materiales	Mallas más densas (< 500mm), con pérdidas ocasionales de materiales desprendimientos y ojos de pescado en formación.	Mallas con grietas muy abiertas y con fragmentos separados. Las mallas son muy densas (< 200 mm), con pérdida ocasional o generalizada de materiales
Bacheos y Parcheos	Intervención de superficie ligada a deterioros del tipo B	intervenciones ligadas a deterioros del tipo A	
		Comportamiento satisfactorio de la reparación	Ocurrencia de fallas en Zonas de reparación

Tabla 5: Nivel de los deterioros en pavimentos asfálticos para carreteras tipo B

NIVEL DE DETERIORO TIPO B						
DETERIORO	NIVEL DE GRAVEDAD					
	1	2		3		
Grieta longitudinal de junta o construcción	Fina y Única	Ancha (10mm o más) sin desprendimientos Fina ramificada		Ancha con desprendimientos o ramificada		
Grietas de contracción térmica	Fisuras finas	Ancha sin desprendimientos, o finas con desprendimientos o fisuras ramificada		Ancha con desprendimiento		
Grietas parabólicas	Fisuras finas	Ancha sin desprendimientos		Ancha con desprendimiento		
Grietas de borde	Fisuras finas	Ancha sin desprendimientos		Ancha con desprendimiento		
Abultamientos	F < 20 mm	20 mm ≤ F ≤ 40 mm		F > 40 mm		
Ojos de pescado (por cada 100 m)	Cantidad	< 5	5 a 10	< 5	> 10	5 a 10
	Diámetro	≤ 300	≤ 300	≤ 1000	≤ 300	≤ 1000
Desprendimientos: Pérdida de película ligante Pérdida de agregados	Pérdidas aisladas	Pérdidas continuas		Pérdidas generalizadas y muy marcadas		
Descascaramientos	Prof. (mm)	≤ 25	≤ 25	> 25	> 25	
	Área (m ²)	≤ 0,8	> 0,8	≤ 0,8	> 0,8	
Pulimento de agregados	no define niveles de gravedad					
Exudación	Puntual	Continua sobre la banda de		Continua y muy marcada		
Afloramientos: De mortero	Localizados y apenas perceptibles	Intensos		Muy intensos		
Desintegración de los bordes del pavimento	Inicio de la desintegración	La calzada a sido afectada en un ancho de 500 mm o más		Erosión extrema que conduce a la desaparición del revestimiento asfáltico		
Escalonamiento entre calzada y berma	Desnivel de 10 a 50 mm	Desnivel entre 500 a 100 mm		Desnivel superior a 100 mm		
Erosión de las Bermas	Erosión incipiente	Erosión pronunciada		La Erosión pone en peligro la estabilidad de la calzada y la seguridad de los usuarios		

Se fue identificando el daño con el tipo de gravedad, para finalmente registrar el tipo de daño acorde a la tabla de deterioro ya sea tipo A o B.

Figura 17: Formato de exploración referido al Formato B1. Registro de deterioros en pavimentos flexibles

EVALUACIÓN DE CARRETERAS CON SUPERFICIE ASFÁLTICA						
DETERMINACION DEL INDICE DE DETERIORO (IS)						
INSPECCION APLICANDO METODOLOGIA VIZIR						
Datos informativos:			Abscisa inicial:			
Tramo de la vía:			Abscisa final:			
Evaluado por:			Ancho:			
Fecha de evaluación:			Longitud:			
Unidad de muestra:			Área de la muestra:			
Tramo:						
FALLAS EXISTENTES						
CATERGORIA DEL DETERIORO	TIPO DE DAÑO	GRAVEDAD	LONGITUD (m)	ANCHO (m)	ÁREA (m2)	EXTENSIÓN (%)

Nota: El formato permitió tomar los datos de campo, en el cual se registraron las fallas superficiales que presentó la superficie de pavimento del tramo estudiado.

Por otro lado, se registró fotográficamente los daños en el pavimento flexible de la vía Macas Entrada a Sinaí, que de forma detallada puede observarse en el anexo 2, y las relevantes las observamos a continuación.

Figura 18: Falla en sección 1 (0+000 a 1+500) de fisuras longitudinales acompañadas de piel de cocodrilo y en otros casos se observa grietas por contracción térmica.



Nota: En esta sección 1 (0+000 a 1+500) se observan fallas longitudinales en ambos carriles, especialmente en los ejes por donde los vehículos concentran la huella del neumático, lo que ha conllevado a que las fisuras se propaguen en forma de bloque, lo que intuye que adicional al sobre esfuerzo de *tránsito* existe aumento de rigidez de la carpeta debido a los cambios de temperatura de la zona de estudio.

Figura 19: Fallas en la sección 2 (1+500 a 2+750) de fisuras longitudinales acompañadas de abultamientos, depresiones y piel de cocodrilo.



Nota: Se observa claramente los abultamientos sobre la calzada en la abscisa

Figura 20: Falla de baches, huecos y piel de cocodrilo sobre la calzada



Nota: Es notorio encontrar baches y huecos que se han desarrollado a partir de fisuras longitudinales y transversales.

Figura 21: Fallas de la sección 3 (2+750 hasta la 6+250) de fisuras longitudinales acompañadas de piel de cocodrilo, hundimientos longitudinales, y grietas por contracción térmica.



Nota: Las fallas longitudinales se hacen notoria por la zona humedad sobre lo cual se nota el agrietamiento paralelo al eje del camino, las cuales pueden ser por distintas causas, deficiencia en las juntas de construcción, asentamiento de capas por tránsito, espesor insuficiente, contracción de materiales, asentamientos aislados en capas interiores y así como una baja rigidez de la capa asfáltica superior, por motivo de las altas temperaturas superficiales (Ballesteros Santos y Benavides Ladino, 2021). De igual manera se observan fisuras que forman rombos las cuales son las conocidas piel de cocodrillo.

Figura 22: Fallas en la sección 4 (6+250 a 7+250) de fisuras en bloque acompañadas de piel de cocodrilo y grietas por contracción térmica.



Figura 23: Fallas de piel de cocodrilo



Nota: Se nota en la figura que existen fisuras que tienen espesores menores a 6mm y son erráticas, es decir se presentan sin seguir ningún patrón de continuidad o cambio y en el mismo caso junto a estas fisuras, también se encuentran grietas longitudinales y transversales que se unen entre sí y figuran una especie de rombos de las cuales se formaran las fallas por piel de cocodrilo.

Figura 24: Falla en la sección 5 (7+500 a 10+000) de grietas por contracción térmica acompañadas de piel de cocodrilo



Nota: En ambos carriles ya se observa la formación de la piel de cocodrilo en la huella que deja el tránsito cerca del eje interno de la calzada y junto se nota una grieta longitudinal a lo largo de la vía, la cual es el patron de donde se incia la formación de rombos a su alrededor. Esta falla es

característica del borde de la llanta vehicular debido al sobre peso o sobreesfuerzo de la carpeta asfáltica.

Figura 25: Fallas en la sección 6 (10+000 hasta la 15+000) donde se distingue grieta longitudinal por contracción térmica acompañadas de piel de cocodrilo



Nota: Aquí se observa la formación de la piel de cocodrillo a un nivel de deterioro elevado y consecuencia de ello se está formando baches junto a la falla.

Figura 26: Fallas en la sección 7 (15+000 a 16+000), carril izquierdo, caracterizadas por grietas longitudinales por fatiga.



Nota: En el carril izquierdo, las grietas transversales y longitudinales ya se ha unido formado un bloque de fisuras, producto del sobreesfuerzo que está sufriendo la carpeta asfáltica y la variación de temperatura que acelera el envejecimiento de la superficie.

Figura 27: Fallas en la sección 7 (15+000 a 16+000) en la que se observa piel de cocodrilo



Nota: Aquí se ve claramente la falla por piel de cocodrilo la cual poco a poco va uniéndose en ambas roderas de la calzada.

Figura 28: Fallas superficiales de la sección 8 (16+000 a 25+000) caracterizadas por piel de cocodrilo acompañado de grietas longitudinales por fatiga y ahuellamiento.



Nota: Es evidente la deformación o asentamiento permanente en la carpeta asfáltica en sentido longitudinal justo debajo de las huellas de los vehículos. De igual manera aquí se observa como las grietas longitudinales y transversales se van uniendo y entre sus espacios la abertura de las fisuras va extendiéndose y profundizándose, esta falla se ubica en las huellas de los vehículos

2.1.4 Estado de condición del pavimento flexible de la metodología VIZIR

Una vez que se ha levantado y medido los deterioros se procede a calcular el Índice de Deterioro Superficial Final I_s , siguiendo la metodología del Anexo B del Instructivo para la inspección visual y la evaluación de los deterioros de los pavimentos asfálticos de carreteras del Instituto de Vías de Colombia. Para el presente proyecto se evaluaron 50 unidades de muestra del pavimento

flexible por cada tramo, sobre las que se obtuvo un valor I_s (Índice Superficial del Pavimento Flexible) promedio de 7 que resulta en una condición de una superficie con malas características, puesto que las fallas que más predomina son: En el Tipo A el Piel de Cocodrilo y en el Tipo B grietas por contracción térmica.

Estos resultados se los obtuvo a partir de la distribución de valores I_s de donde se efectuó un estimado de los tramos homogéneos. La conveniencia de estructurar toda la vía en tramos homogéneos, es que, esto posibilita un análisis particular de aquellas partes de la carretera que presentan características diferentes a otras en una cierta extensión, lo que permite señalar las medidas apropiadas a cada tramo de acuerdo a sus particularidades, que desde el punto de vista técnico y económico debe resultar más apropiado. Es decir, se busca conformar un juicio y proponer medidas que se acomoden a los tramos que pueden diferenciarse, de acuerdo a su estado, dentro de la carretera en estudio. Los tramos homogéneos así determinados aparecen en la siguiente figura.

Figura 29: Determinación de tramos homogéneos en base de los resultados del inventario de fallas superficiales en el pavimento flexible.



Nota: El cambio de la línea verde indica que existe agrupación de valores al 85 por ciento del Índice Superficial del Pavimento Flexible (I_s , metodología VIZIR), por lo tanto, esto marca la sección de análisis, En tanto los puntos representan el valor neto del índice superficial de pavimento por cada unidad de muestreo.

Por lo antes expuesto se realizó un resumen de la evaluación superficial mediante una Tabla 6, en la que se detalla cada sección encontrada, el valor de *Is* y la característica a la que corresponde dicho valor de índice superficial de pavimento conforme lo enuncia la literatura mostrada en la tabla 2.

Tabla 6: Secciones Homogéneas

Secciones	Inicio	Fin	Índice de serviciabilidad (<i>Is</i>) característico	Estado del pavimento	
Sección 1	0+000	1+500	6	Pavimentos deteriorados	altamente
Sección 2	1+500	2+750	7	Pavimentos deteriorados	altamente
Sección 3	2+750	6+250	5	Pavimentos deteriorados	altamente
Sección 4	6+250	7+500	7	Pavimentos deteriorados	altamente
Sección 5	7+500	10+000	6	Pavimentos deteriorados	altamente
Sección 6	10+000	15+000	7	Pavimentos deteriorados	altamente
Sección 7	15+000	16+000	5	Pavimentos deteriorados	altamente
Sección 8	16+000	25+000	7	Pavimentos deteriorados	altamente

Al considerar la literatura donde indican los rangos de *Is* de acuerdo a la metodología Vizir (ver tabla 2 y 6 se resume que el tramo vial tiene resultados de *Is* que van de 5 a 7, lo cual evidencia que el estado del pavimento se encuentra altamente deteriorado y cuyos indicativos manifiestan agrietamientos y deformaciones abundantes, condición se ve reflejado en el deficiente estado superficial de la carpeta asfáltica.

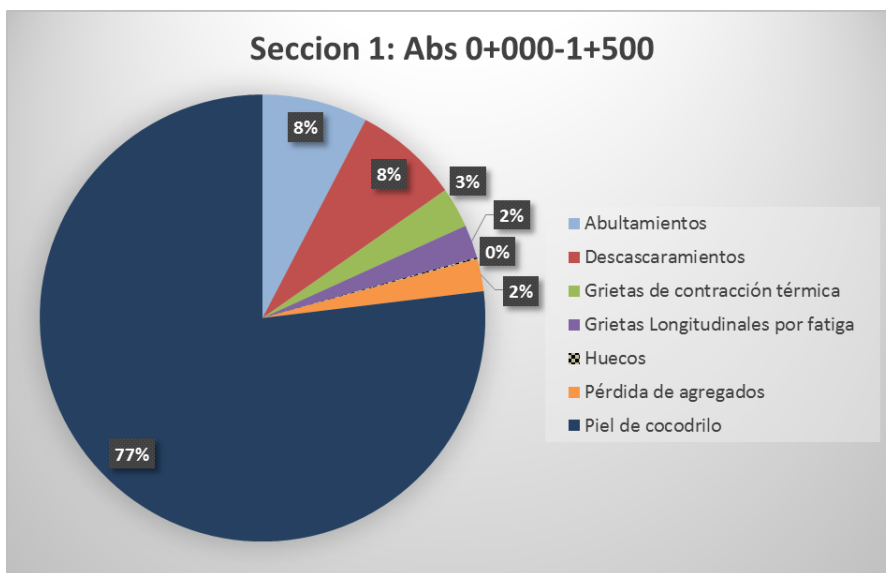
2.1.4.1 Fallas predominantes

Las fallas predominantes registradas en el formato de inventario de fallas (ver Figura 17) se las ha agrupado por secciones, las cuales se enuncian a continuación:

Sección 1

Compuesta por las unidades muestras que van desde la 0+000 hasta la 1+500, mismas que presentan fallas tipo piel de cocodrilo en un 77%, huecos 8% y descascaramientos 8%.

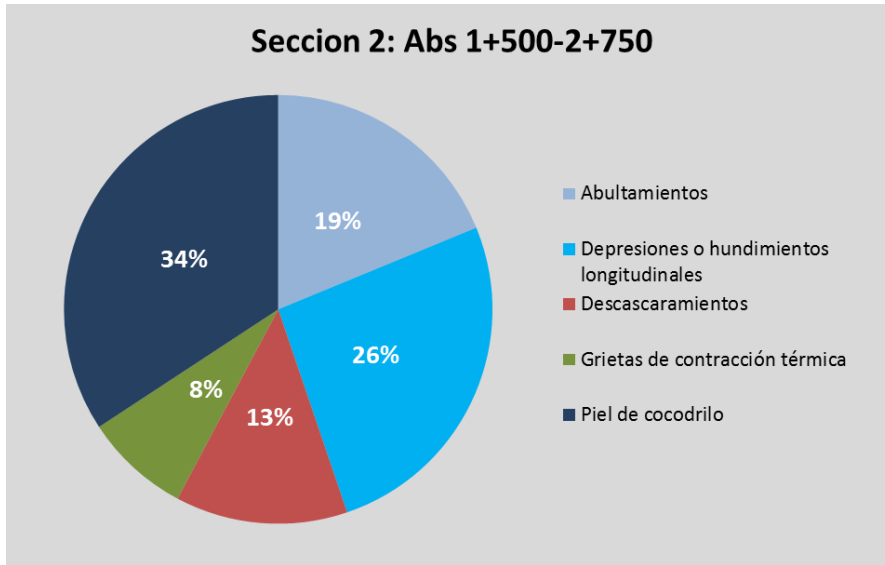
Figura 30: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 1



Sección 2

Muestra las unidades muestreadas desde la 1+500 hasta la 2+750, distinguidas por piel de cocodrillo con 34%, depresiones o hundimientos longitudinales, y abultamientos en un 19%.

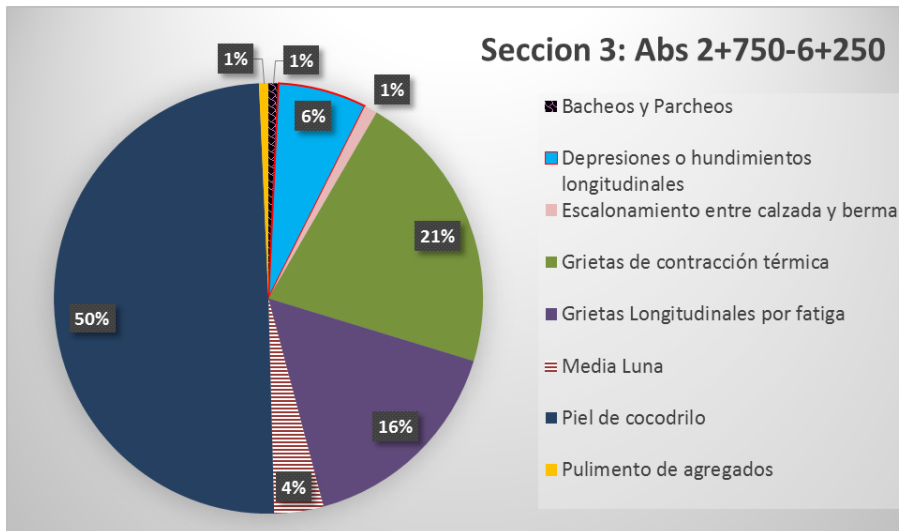
Figura 31: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 2



Sección 3

Esta sección representa la unidad de muestreo evaluada desde la 2+750 hasta la 6+250, caracterizadas por piel de cocodrilo 50%, grietas por contracción térmica 21% y grietas longitudinales por fatiga en 16%.

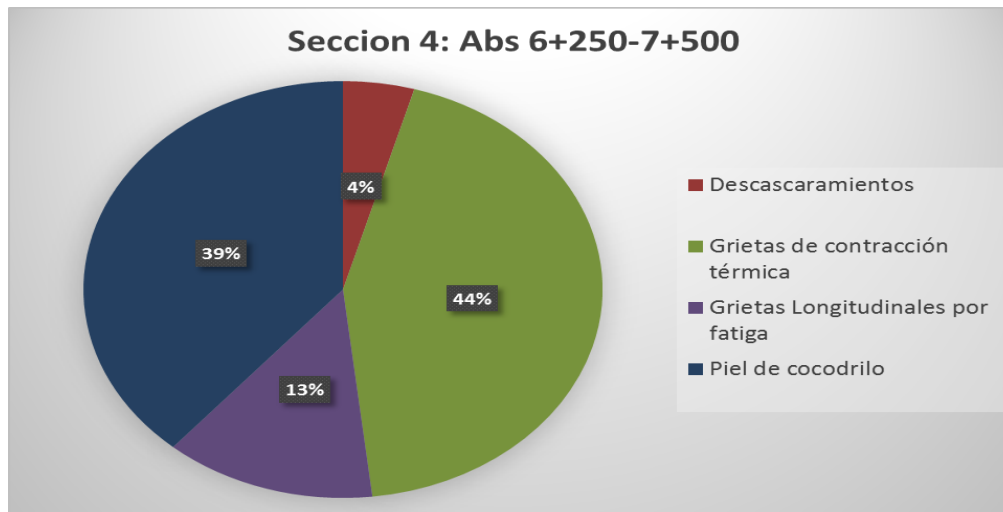
Figura 32: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 3



Sección 4

Aquí se muestran las unidades de muestreo desde la abscisa 6+250 hasta la 7+500, caracterizadas por grietas por contracción térmica (44%), piel de cocodrilo en 39% y grietas longitudinales por fatiga en un 13%

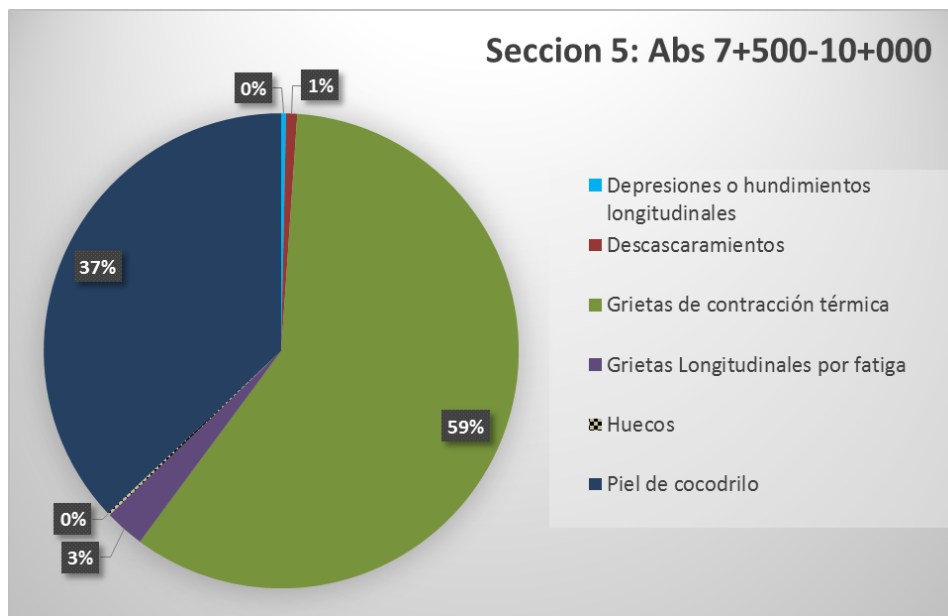
Figura 33: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 4



Sección 5

La sección cinco está compuesta por las unidades muestras que van desde la 7+500 hasta la 10+000, caracterizadas por la presencia de grietas por contracción térmica (59%), piel de cocodrillo en 37% y grietas longitudinales por fatiga en un 3%.

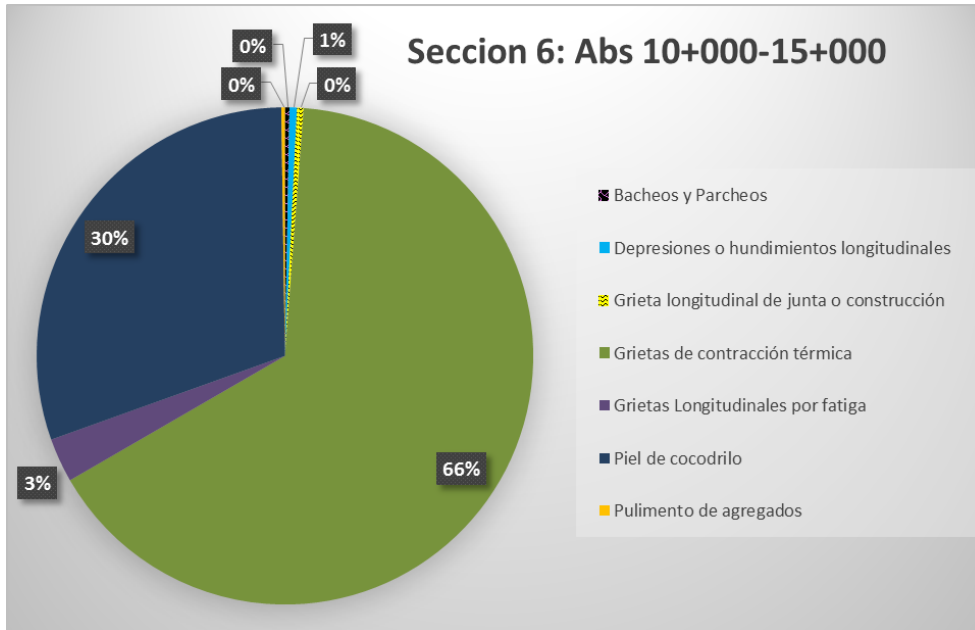
Figura 34: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 5



Sección 6

La sección seis está compuesta por las unidades muestras que van desde la 10+000 hasta la 15+000, caracterizadas por la presencia de grietas por contracción térmica (66%), piel de cocodrillo en 30% y grietas longitudinales por fatiga en un 3%.

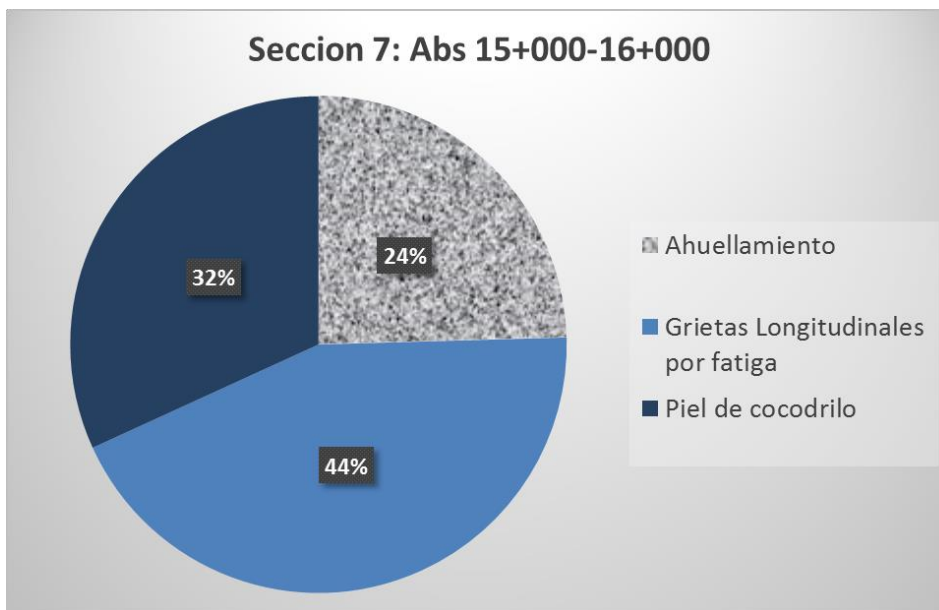
Figura 35: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 6



Sección 7

La sección siete conforma las unidades muestras que van desde la 15+000 hasta la 16+000, caracterizadas por la presencia de grietas longitudinales por fatiga (44%), piel de cocodrillo en 32% y ahuellamiento en un 24%.

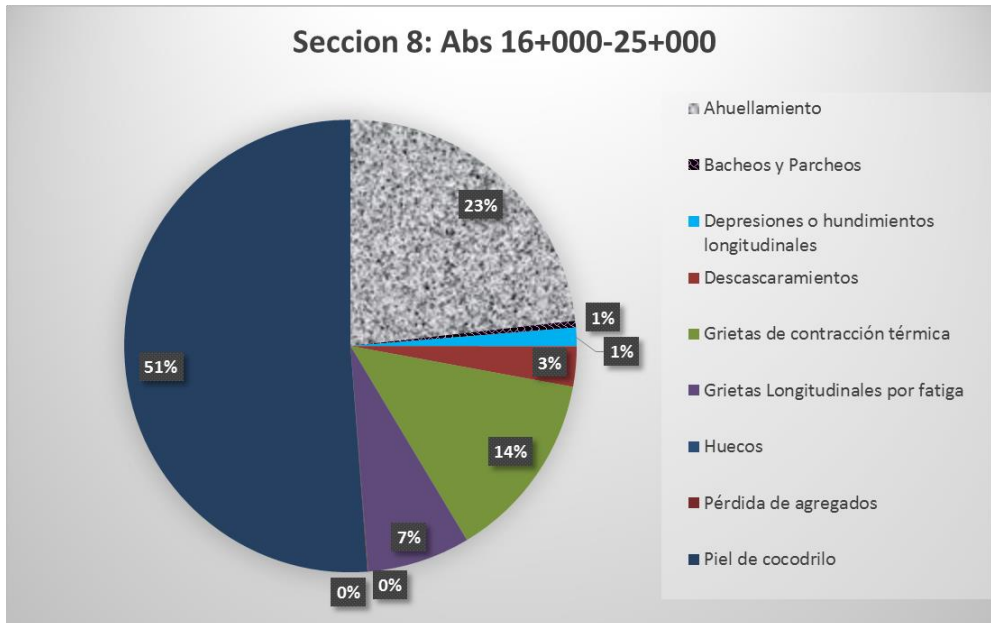
Figura 36: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 7



Sección 8

La sección ocho está compuesta por las unidades muestras que van desde la 16+000 hasta la 25+000, caracterizadas por la presencia de piel de cocodrillo con 51%, ahuellamiento en un 23% y grietas de contracción térmica en 14%.

Figura 37: Fallas superficiales en el pavimento flexible en la sección 8



2.2 Evaluación geotécnica del tramo vial

En este apartado se describirán los espesores de la estructura de pavimento existente que, en conjunto con la medida de la curva de deflexión, son datos importantes que permitieron por un lado recoger información para determinar la capacidad estructural de un pavimento y por otro la calidad física de los materiales.

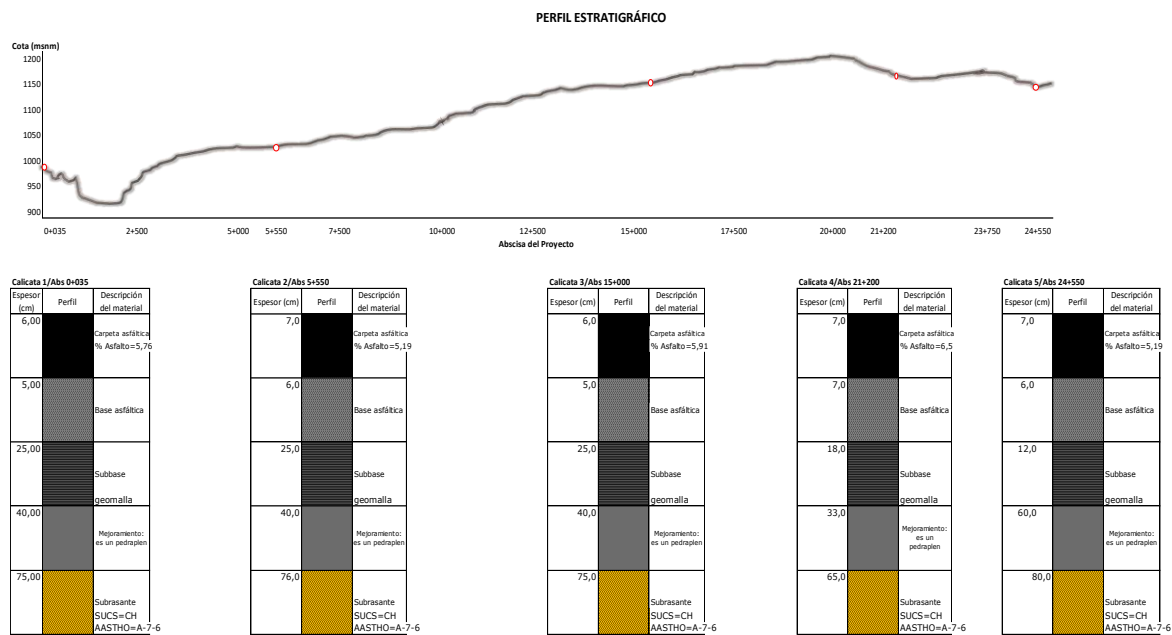
Para el efecto, en el presente proyecto se efectuaron cuatro (4) sondeos por medio de la ejecución de calicatas de 1,50 m x 1,50 m, situadas en base de las condiciones de homogeneidad observadas en el tramo objeto de estudio, tramos homogéneos, tránsito, topografía, con el fin de conocer las características del suelo de soporte y caracterización de los materiales del pavimento.

Las calicatas fueron efectuadas en las abscisas kilómetros 0+035, 5+550, 21+200 y 24+550 ejecutadas a una profundidad de 1.50m, se identificó un perfil estratigráfico conformado por

capas asfálticas de espesor máximo 0.07m, a la cual le subyace una base estabilizada con emulsión asfáltica de 0,06 m, una subbase granular de 0.22m de espesor, caracterizadas como gravas pobremente gradadas con arenas. Como subrasante se indica la presencia de una arcilla de alta plasticidad. De igual manera se tomaron algunos núcleos, para observar la profundidad (cm) de las fisuras y la integridad del núcleo muestreado.

El perfil estratigráfico del tramo vial investigado se presenta a continuación con la figura 17.

Figura 38: Perfil Estratigráfico del tramo vial investigado



2.3 Evaluación estructural del pavimento

La evaluación estructural se la efectuó con el uso del deflectómetro de impacto FWD, sobre el cual se apoya el auscultado del pavimento bajo tres aspectos (Higuera, 2015):

- La exploración geotécnica
- Levantamiento deflectométrico
- La inspección visual (evaluación funcional)

Con la evaluación efectuada se ha medido el comportamiento de los suelos y de los materiales granulares que componen la estructura de pavimento presente; resumiéndola en la determinación del módulo equivalente (EP) y el módulo resiliente de la subrasante (MR). El nivel de confiabilidad de estos parámetros se ubica en el Nivel 1, porque se realizó pruebas de campo

no destructiva con un equipo de deflectometría de impacto ó sus siglas en inglés FWD (falling weight deflectometer). Este nivel es el óptimo para efectos de diseño y planteamiento de propuestas de rehabilitación (Rojas Quintero, 2014).

Cabe señalar que la inspección visual no necesariamente tiene correlación con la evaluación estructural, ya que son dos tipos de evaluaciones distintas, por lo que, la condición superficial del pavimento que está altamente deteriorado no necesariamente significa que estructuralmente el pavimento tiene deficiencia de sus capas. El objeto de realizar una evaluación funcional es un estudio complementario a la evaluación estructural, insumos que permiten a la agencia proponer las intervenciones sobre el pavimento en menor o mayor grado, según corresponda.

2.3.1 Metodología de recolección de datos de deflectometría

La medición de las deflexiones en la estructura de pavimento se la realizó en el Laboratorio de Geotecnia de Suelos y Asfaltos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas con el deflectómetro de impacto PRI-2100, dispositivo de carga dinámica remolcado por un vehículo (Leiva, Perez, & Aguilar, 2017).

El equipo en operación dentro del tramo vial de la referencia fue situando en intervalos de 200 m. En cada punto se bajó la placa y los sensores hasta que se apoyen en la superficie con el objeto de aplicar la carga de 40 Toneladas, cumpliendo la ASTM D 4694 – 96 y ASTM D4695-03. Cuando el magneto cae se aplica la carga y cada geófono distribuidos linealmente a una distancia de 30 cm entre ellos registran las deflexiones producidas en unidad de micrones. Este impacto simula el paso de la rueda de un vehículo pesado y es registrado por un sensor ubicado en el centro del plato, durante el instante en que el disco cae sobre el pavimento.

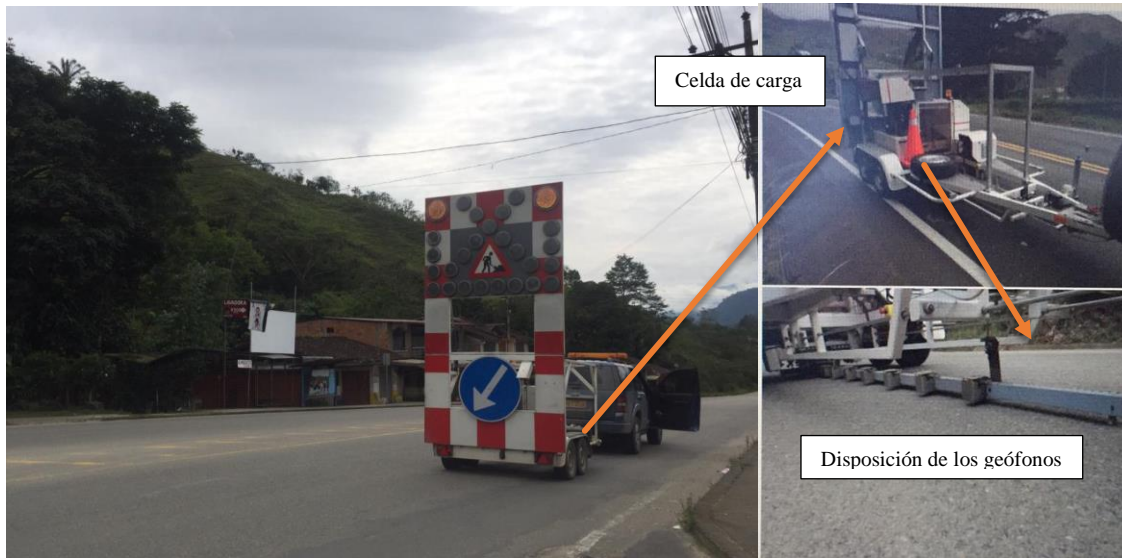
Las deflexiones producidas fueron medidas por un grupo de nueve (9) sismómetros espaciados entre sí cada 0.30m, permitiendo la obtención de la curva completa del cuenco de deflexiones; también aparecen la temperatura y la carga de aplicación del impacto, así como el módulo de la subrasante (MR), el módulo equivalente de la estructura del pavimento (EP) y los números estructurales (SN).

Las mediciones de deflexión evaluaron de forma no destructiva el comportamiento estructural del pavimento del corredor; por ejemplo, por medio de procesos conocidos como retrocálculo se pueden conocer los módulos de cada una de las capas que conforman el paquete estructural,

así mismo, es posible determinar la capacidad estructural en términos del Número Estructural Efectivo de AASHTO.

2.3.2 Ubicación de los puntos tomados en cada progresiva

Figura 39: Apliques realizados en el tramo de análisis para evaluación estructural



Nota: El deflectómetro de impacto deja caer la celda de carga de 40 Tn, en donde la regleta de geófonos mide la deflexión cada 200 metros por cada carril.

2.3.3 Segmentación de la vía

Para efectos de análisis se estableció tramos por cada sitio, en función del tráfico circundante, resultados de secciones homogéneas por deflectometría, longitud evaluada, y por factibilidad constructiva, las cuales se detallan a continuación:

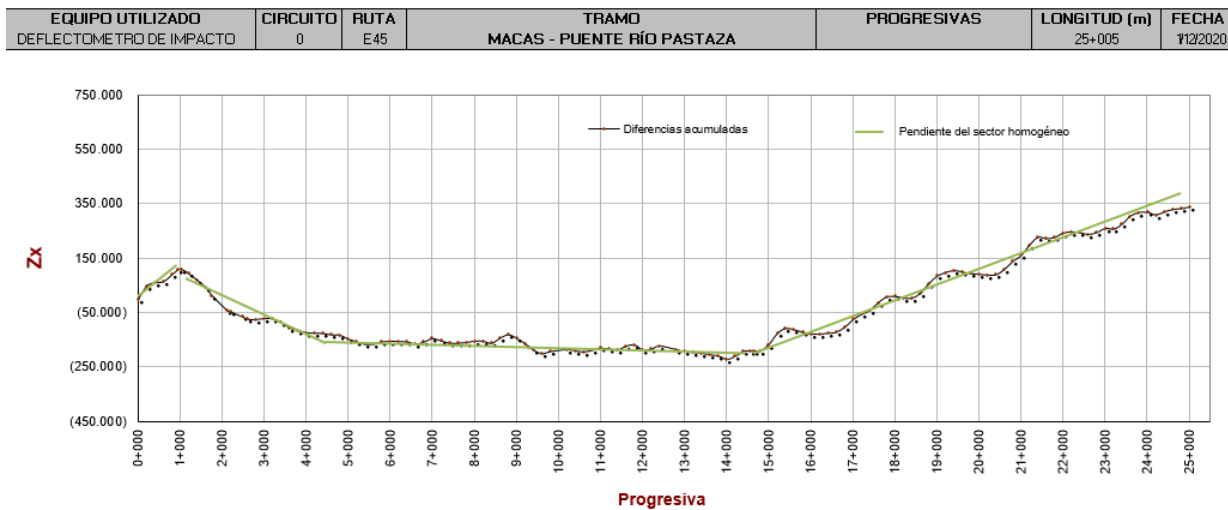
Tabla 7: Tramos del Corredor vial de Macas Entrada a Sinai (0+000 – 25+005)

TRAMO 1	Carril	Macas	Entrada a Sinai
	Derecho	0+000	25+005
TRAMO 2	Carril	Entrada a Sinai	Macas
	Izquierdo	24+099	0+000

2.3.4 Deflexiones del Tramo 1: Macas – Entrada a Sinai (0+000 – 25+005)

Mediante los datos del expediente, asistencia de una hoja de Excel y el procedimiento del método de diferencias acumuladas se obtuvo los valores de la Deflexión Característica para cada una de las secciones homogéneas a lo largo de los segmentos de los tramos evaluados, mostrados en las siguientes figuras.

Figura 40. Secciones Homogéneas a través del método estadístico de diferencias acumuladas del reporte de deflexiones carril derecho, Tramo Macas Entrada a Sinai.



Nota: El perfil de esta figura hace referencia al área bajo la curva de cada dato deflectométrico tomado en campo

De la Figura 40 se aprecia que el área bajo la curva en cada progresiva va cambiando, esto permitió seccionar el tramo por cada cambio de pendiente, y sobre esto, es el resultado de cada sección homogénea indicada en tablas 8. Por ejemplo, en la Figura 40 desde la abscisa 0+000 a la 1+000 se observa un ascenso de Zx (diferencia acumulada sugerida por Aashto 93), lo cual indica una sección homogénea.

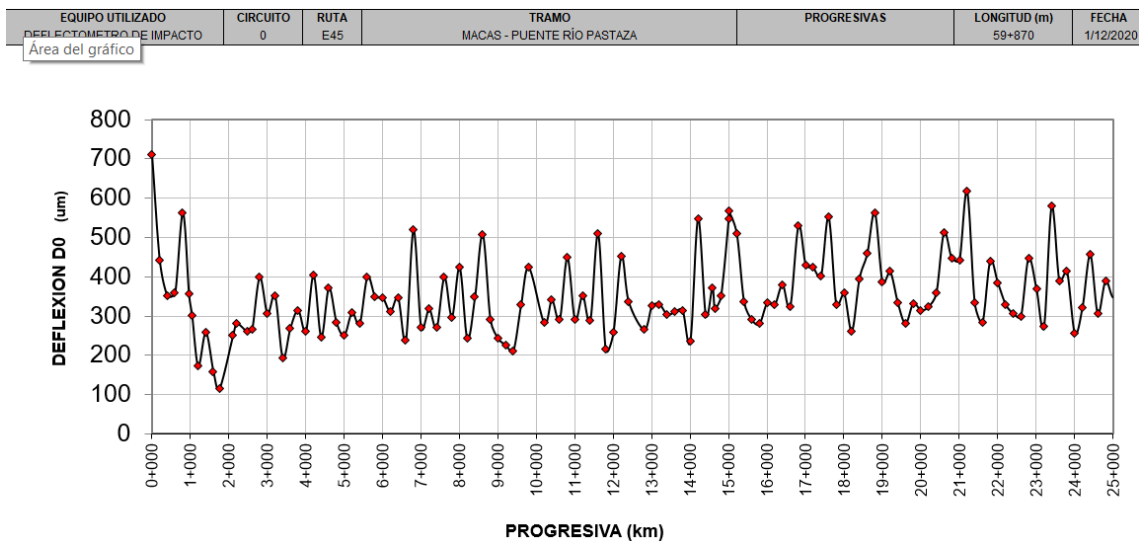
De esta manera una vez que se determina el cambio de pendientes del diagrama de diferencias acumuladas se encuentra las secciones homogéneas que están presentadas en la tabla 8.

Tabla 8: Deflexión Característica de las secciones homogenizadas en el carril derecho del Tramo 1 Macas Entrada a Sinai

Zona SH N°	Desde	Hasta	Longitud (m)	D (1) (um) característica	D (8) (um) característica
1	0+000	1+043	1043	757	42
2	1+043	5+401	4358	419	66
3	5+401	14+574	9173	717	108
4	14+574	25+005	10431	800	110

A continuación, se muestra la figura 41, la cual, representa la deflexión máxima D0 (geófono 1 en el FWD PRI-2100) por cada punto tomado en el carril derecho respecto de la abscisa en donde se realiza la medición deflexométrica.

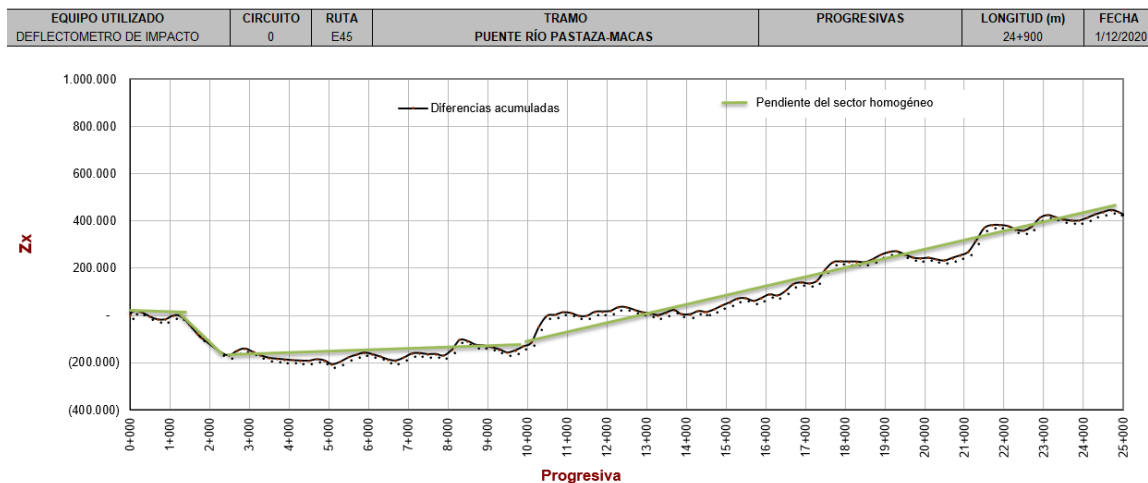
Figura 41: Reporte de deflexiones respecto de la abscisa en el carril derecho sentido Macas- Entrada a Sinai.



2.3.5 Deflexiones del Tramo 2: Entrada a Sinaí - Macas 24+099 – 0+000

Para el carril izquierdo en el Tramo 2 Entrada a Sinaí – Macas se ejecutó el análisis de las deflexiones por el método de diferencias acumuladas sugerido en la AASHTO 93, el cual se efectuó con la ayuda de una hoja de Excel en donde se ingresan los valores que arroja el FWD como abscisas y las deflexiones corregidas, por consiguiente luego se calcula las distancias del intervalo (Δx_i), seguidamente se acumula las distancias ($\Sigma \Delta x_i$), se calcula las áreas para los intervalos (a_i) y se acumula las áreas (Σa_i), finalmente se desarrolla la resta entre $\Sigma a_i - (\Sigma \Delta x_i * \Sigma a_i / \Sigma \Delta x_i)$ para encontrar las diferencias acumuladas, que permiten determinar las secciones homogéneas que tiene el corredor.

Figura 42: Secciones Homogéneas a través del método estadístico de diferencias acumuladas del reporte de deflexiones carril izquierdo, Tramo Entrada a Sinaí Macas.



Nota: El perfil de esta figura hace referencia a las diferencias acumuladas sobre cada punto de medición deflectométrica.

De la figura 42 se encontraron cambios de pendiente que pueden ser incluidos en sectores homogéneos de la misma agrupación, por ejemplo, desde la abscisa 2+499 a la 10+300 se extiende una sola línea dado que las pendientes intermedias llevan la misma tendencia, de esta forma esta sección homogénea indica que los valores tienen una baja dispersión y son unidades que pueden ser consideradas estadísticamente homogéneas. Por ello las secciones

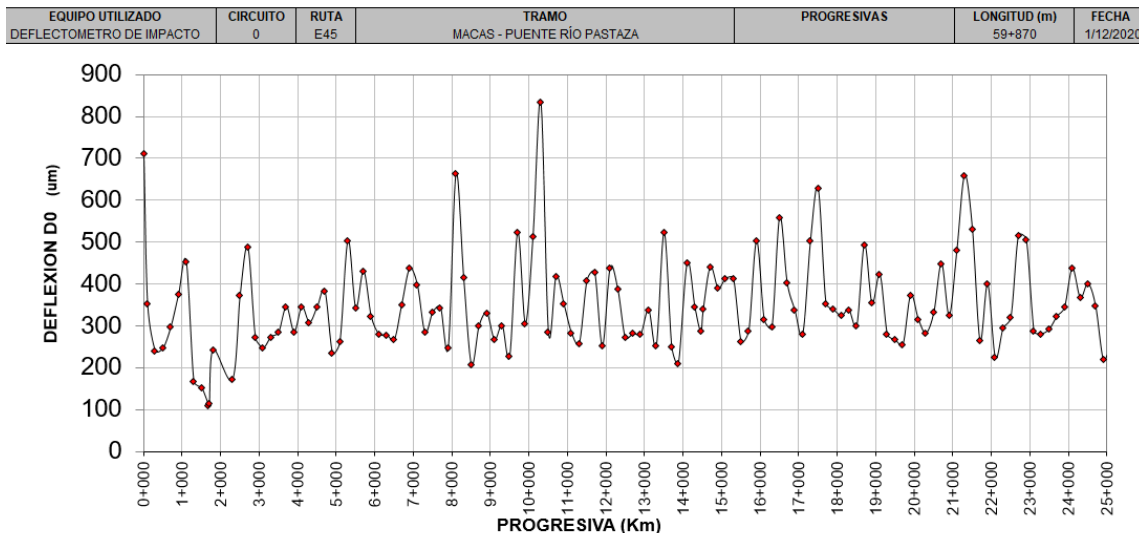
homogéneas determinadas por el diagrama de diferencias acumuladas se las presenta en la tabla 9.

Tabla 9: Deflexión Característica de las secciones homogenizadas en el carril izquierdo del Tramo 1 Entrada a Sináí - Macas

Zona sh n°	Desde	Hasta	Longitud (m)	D(1) (10-2 mm) característica	D(8) (um) característica
1	0+000	1+100	1100	721	42
2	1+100	2+499	1399	440	23
3	2+499	10+300	7801	534	81
4	10+300	24+900	14600	589	99

La figura 42. muestra la deflexión máxima de la estructura de pavimento, cuyas mediciones fueron determinadas en campo a través del FWD, las cuales se reportan a continuación.

Figura 43. Reporte de deflexión máxima respecto de la abscisa en el carril izquierdo, sentido Macas- Entrada a Sinai.



Las figuras 42 y 43 son diagramas que representan características distintas, por cuanto la primera permite definir cuan homogéneos están los datos desde una abscisa a otra, y la segunda permite

conocer la deflexión máxima en cada punto relevado en campo a fin de conocer la dispersión de los datos a lo largo del corredor.

2.3.6 Capacidad Estructural del tramo 1 y tramo 2

Con las deflexiones características procedemos a valorar la capacidad estructural que tiene la estructura de pavimento flexible mediante la metodología AASHTO 1993, donde se valora el número estructural efectivo (SN eff) que tiene la estructura del pavimento a través de las deflexiones en cada sección homogénea deflectométrica. Por lo tanto, una vez realizado los cálculos a continuación se despliegan los resultados de capacidad estructural existente en términos de número estructural efectivo (SN eff), módulo resiliente de la subrasante y el módulo equivalente por cada uno de los tramos evaluados.

Tabla 10: Cálculo de SN efectivo de los tramos evaluados.

		Calculos SN _{EFF} CONFORME AASHTO 93							
TRAMO	CARRIL	Abscisa (Km)		Deflexión característica del tramo			Módulo resiliente de la subrasante en las condiciones actuales	Módulo efectivo del pavimento sobre la subrasante	Número estructural efectivo
		Desde	Hasta	D0 (mm) (10-3 mm)	D8 (mm) (10-3 mm)	Mr (MPa)	Ep (Kg/cm ²)	SN eff. (pulg)	
Macas-Acceso a camino antiguo a Cascadas	Derecho	0+,00	1+043,00	757	42	355,95	2635,50	4,5	
Macas-Upano	Derecho	1+043,00	5+401,00	419	66	312,50	307,24	2,2	
Upano-Santa Rosa	Derecho	5+401,00	14+574,00	717	108	189,23	4201,64	5,3	
Santa Rosa-Entrada a Sinai	Derecho	14+574,00	25+005,00	800	110	185,87	3138,40	5,8	
Macas-Acceso a camino antiguo a Cascadas	Izquierdo	0+,00	1+100,00	721	42	357,77	2834,59	4,6	
Macas-Upano	Izquierdo	1+100,00	2+499,00	440	23	891,42	260,57	2,1	
Upano-Santa Rosa	Izquierdo	2+499,00	10+300,00	534	81	252,56	5716,28	5,8	
Santa Rosa-Entrada a Sinai	Izquierdo	10+300,00	24+900,00	589	99	207,49	4574,66	6,6	

2.4 Evaluación cualitativa del pavimento flexible basados en los resultados de deflectometría

Adicionalmente, sobre los resultados obtenidos de la deflectometría existen parámetros cualitativos que proporcionan información sobre la condición relativa de un pavimento flexible, los cuales han sido formulados bajo las premisas, de evaluación de la condición global del

pavimento de la Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras 2008, en la que se describe lo siguiente. (Intituto Nacional de Vias, 2008)

- Las diferencias entre las deflexiones cercanas al punto de aplicación de carga reflejan la rigidez relativa en las capas superiores del pavimento.

- Las diferencias entre las deflexiones de la parte media del cuenco de deflexión (entre 300 y 900mm del punto de aplicación de carga) reflejan la rigidez relativa en las capas granulares o de apoyo del pavimento (XU B., 2002).

- Las deflexiones medidas cerca al extremo del cuenco de deflexión reflejan bastante bien la condición de la subrasante fundación.

De lo anteriormente descrito, de forma resumida la Tabla 11 muestra cómo se recomienda evaluar el cuenco deflectométrico.

Tabla 11: Parámetros empleados para la Evaluación Deflectométrica Cualitativa

PARÁMETRO	FÓRMULA	INDICADOR
Índice de curvatura superficial	$ICS=d_0-d_{300}$	Junto con otros parámetros, proporciona una idea sobre la rigidez de las capas asfálticas
Índice de daño de la base	$IDB=d_{300}-d_{600}$	Deformación compresiva sobre las capas de apoyo de las capas asfálticas
Índice de curvatura de la base	$ICB=d_{600}-d_{900}$	Deformación compresiva sobre la subrasante

Nota: Parámetros de evaluación de la tabla 1 extraído de Horak, Emery, y James (2015). International Society for sphalt.6th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement

Con los resultados de la deflectometría, se determinó la pendiente o las diferencias de deflexión, y se calificó cada resultado en una escala descriptiva de bueno, malo y regular; seguidamente para evaluar los rangos de cada intervalo se tomó como referencia lo mencionado por Horak (2008) en su artículo Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters, quien define la escala de acuerdo a la tabla siguiente.

Figura 44: Parámetros de evaluación deflectométrica cualitativa

TIPO DE BASE	CONDICIÓN ESTRUCTURAL	D ₀ (μM)	ICS (μM)	IDB (μM)	ICB (μM)
Granular	Buena	< 500	< 200	< 100	< 50
	Regular	500 - 750	200 - 400	100 - 200	50 - 100
	Mala	> 750	> 400	> 200	> 100
Cementada	Buena	< 200	< 100	< 50	< 40
	Regular	200 - 400	100 - 300	50 - 100	40 - 80
	Mala	> 400	> 300	> 100	> 80
Bituminosa	Buena	< 400	< 200	< 100	< 50
	Regular	400 - 600	200 - 400	100 - 150	50 - 80
	Mala	> 600	> 400	> 150	> 80

Nota: Traducción al español de la Table 3 Deflection bowl parameter structural condition rating criteria for various pavement types, extraída desde Horak (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters.

Los rangos de comportamiento para los parámetros del cuenco de deflexiones en pavimentos flexibles, se los calificó de acuerdo lo enunciado en la figura 44, tomando el valor característico de la deflexión en cada sección homogénea por cada geófono (Di). Las secciones homogéneas por deflectometría fueron determinadas en el punto 2.3.4 y 2.3.5, consecuente producto de la aplicación de la resta entre las deflexiones se tiene los siguientes resultados.

Tabla 12: Resultados de Parámetros Evaluación Deflectométrica Cualitativa

TRAMO	Desde	Hasta	Carril	Parámetros Cualitativos					
				Característico de capas superficiales		Característico de las capas de apoyo de la capa asfáltica.		Característico de la fundación	
				Índice de curvatura (ICS) mm	Condición	Índice de daño de la base (IDB)mm	Condición	Índice de curvatura de la base (ICB) mm	Condición
Macas- Acceso a camino antiguo a Cascadas	0+,00	1+043,00	Derecho	499	Mala	155,00	Mala	41	Buena
Macas-Upano	1+043,00	5+401,00	Derecho	213	Regular	85,00	Buena	61	Regular
Upano-Santa Rosa	5+401,00	14+574,00	Derecho	450	Mala	98,00	Buena	44	Buena
Santa Rosa-Entrada a Sinai	14+574,00	25+005,00	Derecho	501	Mala	106,00	Regular	51	Regular
Macas- Acceso a camino antiguo a Cascadas	0+,00	1+100,00	Izquierdo	504	Mala	137,00	Regular	36	Buena
Macas-Upano	1+100,00	2+499,00	Izquierdo	296	Regular	76,00	Buena	58	Regular
Upano-Santa Rosa	2+499,00	10+300,00	Izquierdo	267	Regular	95,00	Buena	47	Buena
Santa Rosa-Entrada a Sinai	10+300,00	24+900,00	Izquierdo	298	Regular	95,00	Buena	51	Regular

Nota: Los resultados muestran un suelo de fundación adecuado en todo el tramo, lo que significa que debe pensarse en una rehabilitación solamente a nivel de capas superiores.

Como se puede apreciar en la tabla 12 en todas las secciones, la capa asfáltica de cada tramo en el carril derecho e izquierdo presentan índices de curvatura superficial mayor a 200 micrones y menores a 400, lo que indica un comportamiento regular de la capa de rodadura, de igual modo se observa ICS mayor a 400 que indica un comportamiento regular de la capa superficial.

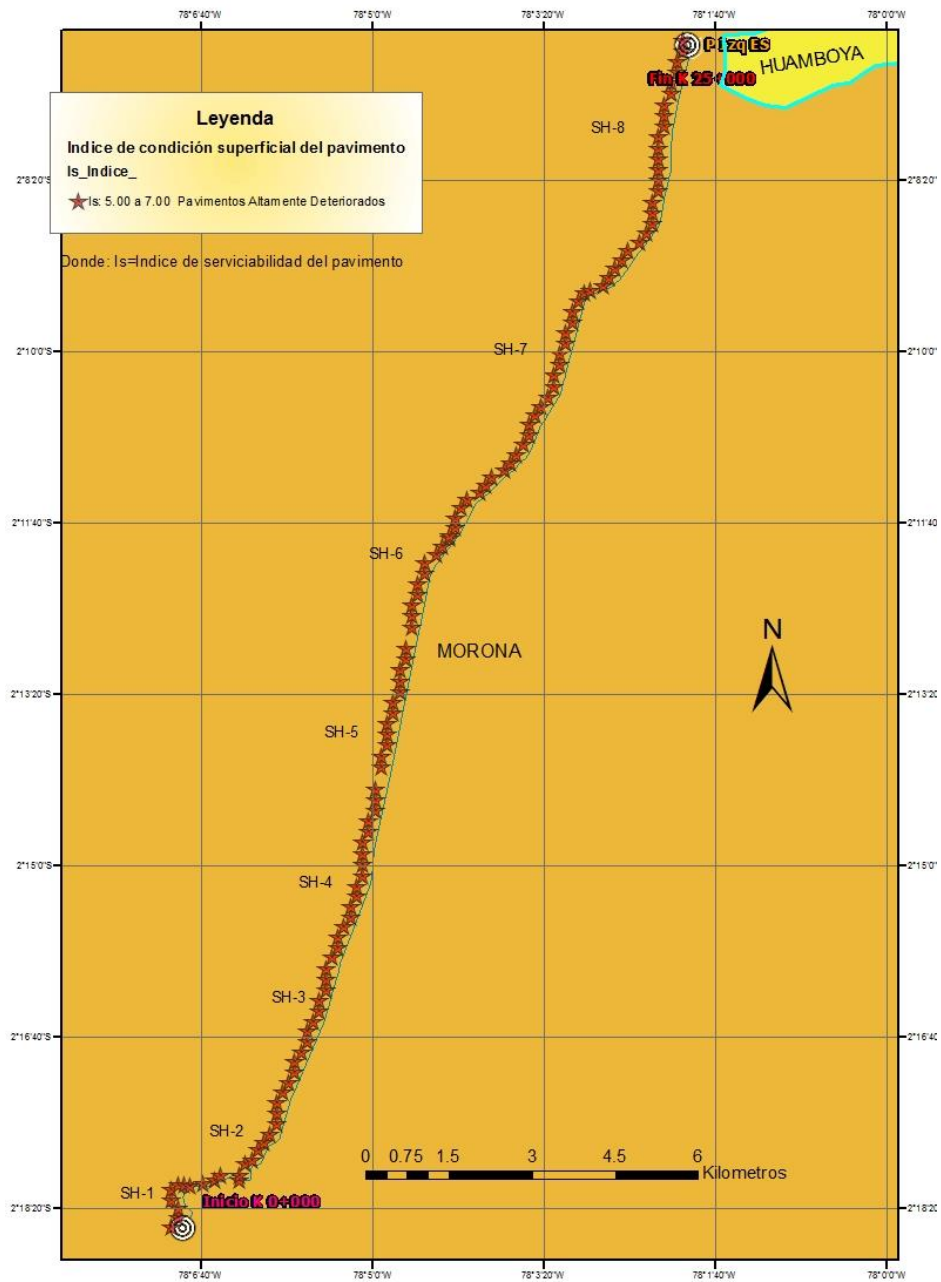
El índice de daño de la base asfáltica (IDB), en la gran mayoría de tramos tiene valores que muestran un desempeño bueno de la capa de apoyo que en este caso es la base asfáltica porque sus valores son menores a 100 micrones, mientras que en cuando los valores están entre los rangos 100 a 150 micrones se considera comportamiento regular que es el caso del carril derecho en el sector km 14+574 a km 25+005 y en el carril izquierdo en el sector km 0+000 a km 1+100. Finalmente, se encontró una condición mala de la capa estabilizada en el sector km 0+000 al km 1+043 del carril derecho.

De igual manera en la Tabla 12 se evidencia que las características del suelo de fundación en la gran mayoría de las secciones evaluadas indican comportamiento categorizado como bueno por cuanto los valores de ICB son menores a 50 micrones, a excepción del sector de carril derecho k 1+043 a 5+401, 14+574 a 25+005, y del carril izquierdo el sector k 1+100 a 2+499, 10+300 a 24+900, donde se presenta un comportamiento regular a nivel de subrasante según los cuencos deflectométricos.

2.5 Resumen de resultados encontrados en la evaluación funcional (inspección visual) y la evaluación estructural del pavimento flexible.

Mediante los resultados de las características del pavimento tanto funcional como estructural, se estableció gráficamente la condición de cada evaluación, por tanto, en algunos tramos homogéneos coincide el deterioro superficial con el estructural, no obstante, estas dos evaluaciones NO deben correlacionarse ya que NO existe una concatenación directa, porque una falla superficial a nivel de carpeta no necesariamente indica que exista una deformación permanente en la subrasante y viceversa. De esta manera, para una observación grafica a continuación se mostrará los resultados encontrados en el corredor de estudio.

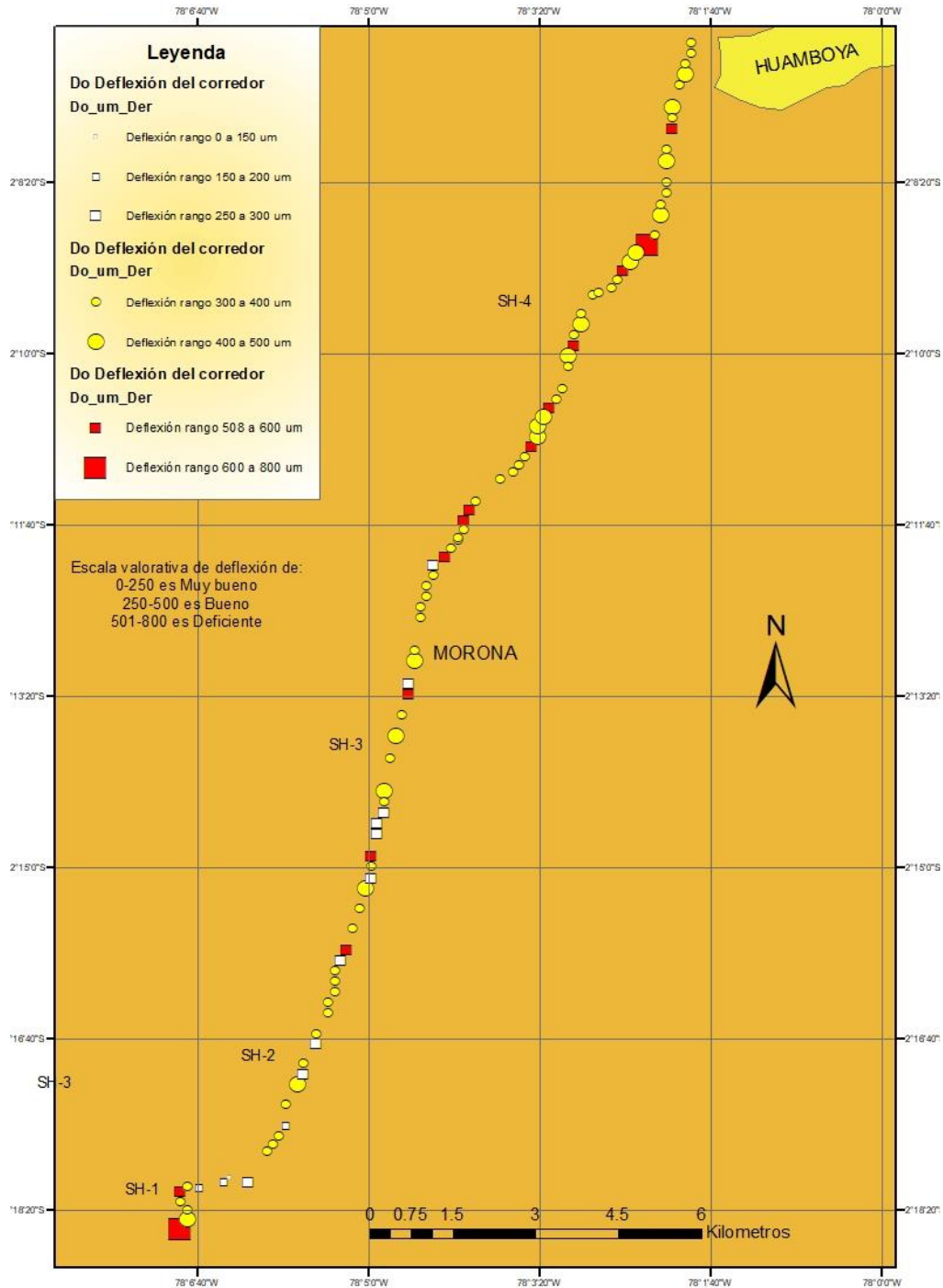
Figura 45: Reporte de deflexiones e índice de condición superficial en el tramo Macas-Entrada a Sinaí.



De la condición superficial se resalta que las secciones homogéneas de los primeros kilómetros van aumentando la intensidad del color hasta llegar a la sección homogénea ocho (8) que corresponde al kilómetro 25+000, tienen una condición superficial crítica con valores que arrojan un índice de condición superficial que van del rango de 5 a 7, cuya tasa refleja que se debe

intervenir inmediatamente con actividades de mantenimiento rutinario, estas actividades pueden ser suplidas si la criticidad de los resultados de la evaluación estructural coincide en esos tramos, donde de acuerdo a la literatura de la tabla 2: Rango de Is según metodología Vizir, se debe intervenir inmediatamente con actividades de bacheo mayor y /o menor, sellado de fisuras, limpieza de cunetas, reconfiguración de la rasante, etc.

Figura 46: Reporte de deflexiones máximas en el tramo Macas- Entrada a Sinai.



Los resultados estructurales permiten definir que el corredor de forma generalizada tiene una respuesta estructural de buena a deficiente ya que los valores de deflectometría por cada punto reflejan que están sobre los 500 um, que significan que cualitativamente tienen regular condición

estructural. Por otra parte, existen puntos donde existe alta deflexión máxima que conlleva a que la estructura de pavimento debe ser revisada, ya sea porque el drenaje superficial no funciona de forma correcta en estos sitios, o porque son puntos donde se ubican alcantarillas u sitios que coinciden con lugares donde existen fallas de asentamientos y/o puntos críticos. En dichos sitios la deflexión sobrepasa los 800 μm , de modo que deben ser tratados de forma independiente por la existencia de alcantarillas, y/o pasos inferiores de agua. De este modo, estos sitios exigen un análisis geotécnico e hidráulico distinto de una evaluación estructural del pavimento y no tienen relación con las mediciones deflectométricas que en la gran mayoría del corredor refleja el pavimento.

Capítulo III: Rehabilitación del Pavimento

En este capítulo se describe el proceso por el cual la estructura del pavimento debe ser restaurada a su condición de soporte original. Por lo tanto, una vez realizada la evaluación estructural y funcional del tramo de vía, se debe tomar en cuenta los siguientes insumos:

1. Período de diseño
2. Tránsito de diseño
3. Vida remanente

3.1 Período de diseño

Este periodo corresponde a la vida útil de la estructura de pavimento, en donde al final del periodo es palpable su obsolescencia o desgaste (Mendez Roja & Ramirez Angulo, 2017). A partir de esta premisa es que en la actualidad no existe un método de análisis y diseño de pavimentos flexibles que esté basado en teorías propias y coherentes para cada región, ya que el comportamiento de los pavimentos efectuado por un método de diseño sólo se puede realizar a partir de la validación de la observación empírica del funcionamiento a largo plazo del pavimento, y en nuestro país la gran mayoría de diseño de pavimentos se basan en la normativa americana AASHTO 93, la cual bajo variables tales como las condiciones climáticas, prácticas de conservación y mantenimiento, efectos de la carga repetida a largo plazo, variaciones de los materiales y prácticas constructivas, muestran que los pavimentos cerca de los 10 años de su construcción presentan un desgaste considerable. Por ende, el presente diseño de rehabilitación se basa en ese periodo de diseño (Rodríguez, Thenoux , & González, 2016).

3.2 Tránsito de diseño

3.2.1 Tránsito promedio diario anual

El tráfico promedio diario anual (TPDA) es el volumen vehicular diario de un año calendario. Debido al estado de excepción producto de la pandemia COVID-1, no fue posible realizar conteos automáticos, sin embargo, se ejecutó un conteo muestral en el año 2019, el cual ha sido

proyectado al 2021, así mismo considerando las tasas de crecimiento estipuladas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador para la provincia de Morona Santiago.

Mediante los datos obtenidos de clasificación vehicular del estudio de tránsito del año 2019, efectuado por la Unidad de Factibilidad de la Dirección de Estudios del Ministerio de Transporte y Obras Públicas se determinó el tráfico actual (2021) de TPDA = 4550 vehículos diarios anuales y para el año 2031 de 7620 Veh/día

3.2.2 Tasas de crecimiento

De acuerdo a la información proporcionada por la Unidad de Factibilidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas quienes poseen las tasas de crecimiento de la provincia de Morona Santiago y cuyos datos se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 13: Tasas de crecimiento vehicular de la provincia de Morona Santiago

Período	Livianos	Buses	Camión
2016-2021	3.93	2.96	3.23
2021-2025	3.50	2.63	2.88
2025-2030	3.15	2.36	2.59
2030-2040	2.86	2.15	2.35

Nota: Tabla proporcionada por la Dirección Nacional de Estudios del Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

3.2.3 Número de ejes equivalentes (ESAL)

Para determinar el número de ejes equivalente se consideró los factores de equivalencia de carga basados en los pesos máximos permitidos por la regulación vigente (Acuerdo Ministerial 018-2016 del 5 de mayo del 2016) y la ley de la cuarta potencia obteniendo los siguientes resultados (Intituto Nacional de Vias, 2008):

Tabla 14: Factores de ejes equivalentes adoptados

Tipo de vehículo	Factor equivalencia de carga
Buses 2EJ	1.80
Buses 3J	2.56
Camiones 2D	0.56
Camiones 2DA	0.57
Camiones 2DB	4.5
Camiones 3A	4.43
Camiones 4C	2.45
Camiones 3S2	7.59
Camiones 3S3	5.61

Nota: Resultados del cálculo de factor daño por eje en cada tipo de vehículo

Sobre la base de la información de tránsito y los factores de daño de la Tabla 14, se determinó los ESAL para un período de 5 y 10 años, a partir del 2021, contemplando un factor de distribución direccional del 50%, junto a un factor de distribución carril de 0.90, mismo detalle que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 15: Cálculo del número de ejes equivalentes a 8.2 Ton

Tiempo Años	Año	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Pesado	Camión 2 Ejes Pequeño 2D	Camión 2 Ejes Mediano	Camión 2 Ejes Grande 2DB	Camión 3 Ejes 3-A	Camión 4 Ejes 4-C	Camión 5 Ejes 3S2	Camión 6 Ejes 3S3	ESAL	CUMESAL	
	2018	-	145	-	-	117	-	143	30	2	11	447.959	447.959	
	2019	-	157	-	-	127	-	155	33	2	12	485.549	933.508	
	2020	-	170	-	-	137	-	168	35	2	13	526.294	1.459.802	
0	2021	-	185	-	-	149	-	182	38	3	14	570.458	2.030.260	
1	2022	-	199	-	-	161	-	197	41	3	15	616.231	2.646.491	
2	2023	-	215	-	-	174	-	213	45	3	16	665.678	3.312.169	
3	2024	-	233	-	-	188	-	230	48	3	18	719.092	4.031.261	
4	2025	-	251	-	-	203	-	248	52	3	19	776.792	4.808.052	
5	2026	-	271	-	-	219	-	267	56	4	21	836.756	5.644.809	
6	2027	-	292	-	-	235	-	288	60	4	22	901.350	6.546.158	
7	2028	-	314	-	-	254	-	310	65	4	24	970.929	7.517.088	
8	2029	-	339	-	-	273	-	334	70	5	26	1.045.880	8.562.968	
9	2030	-	365	-	-	294	-	360	75	5	28	1.126.617	9.689.585	
10	2031	-	392	-	-	316	-	387	81	5	30	1.210.747	10.900.332	
11	2032	-	421	-	-	340	-	415	87	6	32	1.301.160	12.201.491	
12	2033	-	453	-	-	365	-	446	94	6	34	1.398.324	13.599.815	
13	2034	-	486	-	-	392	-	480	101	7	37	1.502.743	15.102.558	
14	2035	-	523	-	-	422	-	516	108	7	40	1.614.961	16.717.519	
15	2036	-	562	-	-	453	-	554	116	8	43	1.735.558	18.453.077	
16	2037	-	604	-	-	487	-	595	125	8	46	1.865.161	20.318.238	
17	2038	-	649	-	-	524	-	640	134	9	49	2.004.442	22.322.680	
18	2039	-	697	-	-	563	-	688	144	10	53	2.154.123	24.476.803	
19	2040	-	749	-	-	605	-	739	155	10	57	2.314.983	26.791.786	
													CUMESAL x 10 ⁶	10,90
													Factor Distribución Direccional	0,5
													Factor Distribución Carril	0,9
													Trafico Diseño MESAL	4,9

Es importante recalcar que al número de ejes equivalentes determinado en la tabla 15 se le aplicó un factor de ajuste por las presiones de contacto de las llantas sobre el pavimento, que está en función de la presión de inflado que es de 65 PSI y de un espesor de 7 cm de la carpeta asfáltica, sobre lo que resulta 5,640,921.62 de repeticiones de ejes equivalentes que pasaran en el periodo de diseño (Instituto Mexicano del Transporte y Secretaria de Comunicaciones y Transportes, 1992).

3.3 Diseño de alternativas de rehabilitación

Con los datos de módulo equivalente, módulo resiliente del pavimento, módulo de la subrasante, determinación de la capacidad estructural de la estructura de pavimento y el conocimiento de las proyecciones de tráfico expresado en ejes simples de carga equivalente (ESAL), se procede a determinar el reforzamiento necesario para el período de diseño convenido para 10 años (Restrepo Sierra & Stephens Zapata, 2015).

Por lo tanto, tomando como referencia la ecuación básica de diseño planteada por la AASHTO (ecuación 3), se ha estimado el número estructural requerido, y consecuentemente este valor se

comparó dicho valor con el número estructural efectivo definido por el análisis deflectométrico. La comparación permitió definir si existe la necesidad de realizar un refuerzo estructural al pavimento para soportar las cargas de tráfico que se prevé circularán durante el periodo de diseño.

$$\log W_{18} = Z_R - S_o + 9.36 \log(SN+1) - 0.20 + \frac{\log \frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$

Ecuación 3

P0= Índice de serviciabilidad inicial, 4.2

Pt = Índice de serviciabilidad inicial 2.5

R = Confiabilidad 90%

So = Desviación estándar 0.49 (rehabilitación)

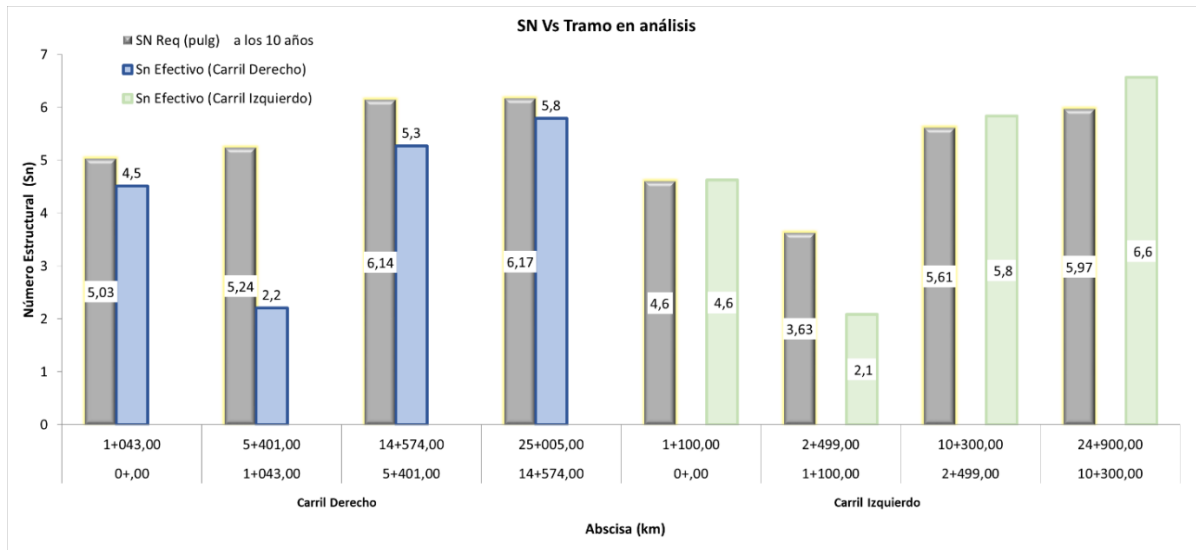
MR = Modulo de resiliencia de la subrasante. Tomado a partir de resultados retro cálculo según metodología AASHTO (Ver acápite 2.2.6).

Teniendo en cuenta lo anterior, en las siguientes tablas se presenta un resumen del análisis estructural de la aplicación de la metodología AASHTO, incluyendo el Mr de subrasante empleado, el Numero Estructural Efectivo, el Numero Estructural Requerido a los 10 años de diseño, y el espesor teórico de refuerzo estimado en función de un coeficiente de aporte de la mezcla asfáltica de 0.42 (acorde al módulo dinámico de la mezcla estimado en 3000MPa para las condiciones de temperatura del proyecto)

Tabla 16: Resumen del análisis de vida residual y espesor de refuerzo con metodología AASHTO/93

Calculos SNReq SEGUN AASHTO 93											
TRAMO	Desde	Hasta	Calzada	TPDA actual	Ejes equivalentes a los 10 años	Mr de la subrasante(PSI)	SN efectivo (pulg)	SN Req (pulg) a los 10 años	SN Req < SN efectivo	SN ajustado (pulg)	Refuerzo - Espesor (cm)
Macas-Acceso a camino antiguo a Cascadas	0+,00	1+043,00	Derecho	3896	5,641E+06	5162,66	4,51	5,03	Insuficiencia estructural	1,0	3,00
Macas-Upano	1+043,00	5+401,00		3896	5,641E+06	4532,41	2,21	5,24	Insuficiencia estructural	3,0	8,00
Upano-Santa Rosa	5+401,00	14+574,00		3896	5,641E+06	2744,61	5,27	6,14	Insuficiencia estructural	1,0	3,00
Santa Rosa-Entrada a Sinai	14+574,00	25+005,00		3896	5,641E+06	2695,76	5,79	6,17	Insuficiencia estructural	1,0	3,00
Macas-Acceso a camino antiguo a Cascadas	0+,00	1+100,00	Izquierdo	3896	5,641E+06	5189,01	4,62	4,6	La estructura cumple	-	-
Macas-Upano	1+100,00	2+499,00		3896	5,641E+06	12929,01	2,09	3,63	Insuficiencia estructural	1,0	3,00
Upano-Santa Rosa	2+499,00	10+300,00		3896	5,641E+06	3663,00	5,84	5,61	La estructura cumple	-	-
Santa Rosa-Entrada a Sinai	10+300,00	24+900,00		3896	5,641E+06	3009,41	6,57	5,97	La estructura cumple	-	-

Figura 47: Número estructural efectivo y requerido a 10 años para el carril derecho e izquierdo.



Nota: La figura 47, muestra en las barras grises el numero estructural requerido a 10 años, las barras azules y verdes representan el numero estructural presente en el pavimento a la hora de haber sido evaluado por carril.

A partir de la tabla 16 y la figura 47, se identifica que para el carril derecho del tramo 1 Macas-Entrada a Sinaí, todos los sectores homogéneos presentan un SN efectivo, inferior al valor del SN requerido, indicando que la estructura existente requiere de un refuerzo o estrategias de

rehabilitación que permitan incrementar en cierta medida la capacidad estructural del pavimento para satisfacer de manera satisfactoria los requerimientos establecidos por el tránsito de diseño.

De otra parte, para el tramo 2 el análisis de vida residual muestra que el número estructural efectivo (SN efectivo) es superior al valor del SN requerido en la mayoría de las secciones homogéneas, a excepción de la sección homogénea de la abscisa 1+100 a 2+499, donde el número estructural presente no soportará el número de ejes equivalentes previstos a 10 años, debido a que demanda de un número estructural mayor, significando que se requiere reforzar este sitio.

Por lo antes expuesto, de forma general, el pavimento presenta una adecuada capacidad estructural para satisfacer las solicitudes impuestas por el tráfico de diseño, a excepción del sector K1+100 a K2+499 de la calzada izquierda, para el cual se establece un refuerzo teórico de 1 pulg, respectivamente, para satisfacer las cargas impuestas por el tráfico de diseño (periodo de análisis 10 años).

En consecuencia, de la figura 47, se elige un refuerzo promedio de 2 pulgadas para los sitios que requieren refuerzo.

3.3.1 Resumen de resultados de evaluación estructural, funcional, geotécnica y cualitativa de las secciones del tramo vial Macas Entrada a Sinai

Con todos los resultados se efectuó una tabla comparación del diagnóstico evaluado con la evaluación funcional y con la evaluación estructural efectuada en el carril derecho e izquierdo del tramo vial Macas Entrada a Sinaí, de la Red Estatal E45.

Tabla 17: Resultados de evaluación estructural y funcional del tramo vial Macas Entrada a Sinai

TRAMO	Desde	Hasta	Índice de daño de la base (IDB)mm	Índice de curvatura de la base (ICB) mm	DI(mm) (10-3 mm) característico del tramo	Índice de serviciabilidad final (Is)	Estado del Pavimento	Trabajos de mantenimiento o requeridos	Intervención
Macas-Acceso a camino antiguo a Cascadas	0+,00	1+043,00	Malá	Buena	757	6	Pavimentos altamente deteriorados	Son Indicativos de pavimentos con agrietamientos y deformaciones abundantes, cuyo deficiente estado superficial	Hasta nivel de base
Macas-Upano	1+043,00	5+401,00	Buena	Regular	419	7			Hasta nivel de base
Upano-Santa Rosa	5+401,00	14+574,00	Buena	Buena	717	5			Hasta nivel de base
Santa Rosa-Entrada a Sinai	14+574,00	25+005,00	Regular	Regular	800	7			Hasta nivel de base
Macas-Acceso a camino antiguo a Cascadas	0+,00	1+100,00	Regular	Buena	721	6			Hasta nivel de base
Macas-Upano	1+100,00	2+499,00	Buena	Regular	440	7			Hasta nivel de base
Upano-Santa Rosa	2+499,00	10+300,00	Buena	Buena	534	5			Solo a carpeta asfáltica
Santa Rosa-Entrada a Sinai	10+300,00	24+900,00	Buena	Regular	589	7			Solo a carpeta asfáltica

Nota: Resumen general de los datos estructurales, funcionales y cualitativos encontrados en el tramo evaluado.

Con la asistencia de la remarcación de colores se definió hasta donde es necesario la intervención estructural y funcional; consecuentemente se apreció que el índice de serviciabilidad final de la condición superficial de pavimento tiene un rango de 6 a 7 en todo el tramo, lo cual se categoriza en un pavimento altamente deteriorado, por ende, requiere la intervención de la carpeta asfáltica para mejorar la condiciones de serviciabilidad y confort del usuario de la vía.

Por otro lado, a nivel estructural, se ha encontrado que la capa de base asfáltica precisa mejorar su comportamiento en el sector km 0+000 a km 1+1000 del carril derecho e izquierdo. Así mismo a nivel de base debe mejorarse el comportamiento del sector km 14+574 a km 25+005 carril derecho; sin embargo, por cuestiones constructivas se recomienda aplicar la misma intervención en ambos carriles.

3.3.2 Alternativas de intervención con la determinación de esfuerzos admisibles

Teniendo en cuenta los resultados de la evaluación funcional y estructural del pavimento existente, evaluación cualitativa de la deflectometría y evaluación geotécnica, en este apartado se definió las propuestas de intervención, usando el software de IMT-PAVE-ECUADOR,

herramienta desarrollada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador en coordinación con el Instituto Mexicano del Asfalto de México. Este software tiene incorporado espectros de carga de la red estatal efectuados en Aloag, Ricaute y Nobol, de los que se eligió el que tiene tránsito característico al sitio de análisis y consecuente se ingresa preliminarmente los espesores encontrados en la estructura de pavimento de cada sector y los elegidos preliminarmente de la metodología AASTHO 93 para la rehabilitación, junto con los módulos resilientes de cada capa determinados en la evaluación estructural del capítulo II; de esta manera el software analiza fatiga de las capas asfálticas y deformación permanente de la estructura de pavimento, verificando que cumpla con la vida útil (10 años) del proyecto.

Las propuestas de rehabilitación analizadas se basan en recuperar materiales de la zona, para seguidamente mezclar con material cementante como alternativa uno y la otra propuesta con alternativas de rehabilitación convencionales (materiales 100% granulares y vírgenes).

3.3.2.1 Alternativa de la sección 1 km 0+000 a km 1+100, carril derecho e izquierdo

Alternativa 1. Fresado y reposición de carpeta con análisis a 10 años

En base a las modelaciones efectuadas en el software IMT (Ver anexo 4), esta alternativa de intervención consiste en realizar el fresado de la capa asfáltica existente en un espesor de 5.00 cm, para posteriormente realizar el sellado de grietas, parcheos y/o bacheos localizados y luego conformar una capa de nivelación de mínimo 1.0cm. Sobre el resaneo se conformará una mezcla asfáltica de capa de rodadura correspondiente a 5.0cm.

En base al análisis de esfuerzos y deformaciones de la estructura de pavimento planteada se cumple con el periodo de vida útil (10 años) diseñado y propuesto para la presente alternativa de rehabilitación.

Alternativa 1.1. Fresado y reposición de carpeta con análisis a 20 años

Como curiosidad sobre la misma alternativa 1. se definió hipotéticamente que el periodo de vida útil sea de 20 años, con el número de ejes equivalentes proyectados al año 20. De lo que resulta que la estructura de pavimento se deforma permanente en el año 6.6, tanto determinísticamente como probabilísticamente de prestación de servicio.

Alternativa 2. Fresado y Recuperación de materiales mezclados con aglutinante(cemento)

Esta alternativa propone fresar la capa de base y carpeta asfáltica para mezclarla con un material cementante de bajo grado de hidratación, proponiendo este reciclado como capa de base, seguidamente una capa asfáltica de 5.0 cm nueva.

El módulo de la base estabilizada con cemento se lo ha obtenido ensayando los materiales extraídos de las calicatas efectuadas en el tramo vial en esta sección de las capas de base y carpeta asfáltica, la cual se ha mezclado realizando varias iteraciones en laboratorio con 3 y 7 por ciento de material cementante tipo MH (Cemento vial), dichos resultados con mayor detalle se describen más adelante en el numeral 4.1

De acuerdo a los resultados de la modelación, la estructura reciclada tiene una vida remante de fatiga y deformación que supera los 10 años de diseño.

De la misma manera se efectuó el mismo análisis anterior con un periodo de vida útil de 20 años y se encontró *que esta alternativa de rehabilitación cumple la consideración de diseño respecto a la vida útil de 20 años, en donde se estima que la Entidad no ejecutara ninguna actividad de carácter estructural porque se cumple una vida por fatiga y deformación.*

3.3.2.2 Alternativa de la sección 4 desde el km 14+574 al km 25+005, carril derecho e izquierdo

Los valores de módulo resiliente incorporados de cada capa son los siguientes:

El módulo de la subrasante al haberse clasificado según AASHTO como un suelo A-7-6 y según SUCS CH, mediante ensayos de laboratorio, se incorpora un valor típico de 55 MPa.

El módulo de la capa de mejoramiento ha sido tomado del valor determinado por deflectometría que se encuentra en un rango de 185 Mpa a 207 Mpa, y para el presente caso se toma el valor crítico de 185 Mpa.

Para las capas granulares se tomó en cuenta que son materiales tipo GM en donde los valores de módulo resiliente están en rango de 1400 a 14000 MPa, de acuerdo a lo encontrado en la tabla 1-4 de Vasquez Monteros (2016) en Sarango Cueva (2019), por tanto, se tomó un valor conservador y crítico de 1800 Mpa.

Respecto del módulo de la capa estabilizada se toma el valor obtenido de los ensayos efectuados el cual es 1500 Mpa

Alternativa 1. Fresado y Reposición de carpeta asfáltica

Se plantea el fresado de la capa asfáltica existente en un espesor de 5.0cm, para posteriormente realizar una limpieza y preparación de la superficie (sello de grietas, parcheos y/o bacheos localizados), así como conformar una capa de nivelación de mínimo 1.0cm, sobre la cual se dispondrá una geomalla en fibra de vidrio de resistencia a la tensión última de 100kN/m (tanto en sentido longitudinal como transversal). Finalmente, se construirá la capa de rodadura en un espesor mínimo de 7.5 cm tomando en cuenta la limitada gestión de mantenimiento.

Los resultados del análisis espectral de esfuerzos y deformaciones de la alternativa de intervención planteada indica que el colocar una carpeta asfáltica de 7.5 de espesor permite una vida por fatiga y evita la deformación permanente en un tiempo mayor a los 20 años, con lo que se demuestra que la alternativa técnicamente es adecuada.

Alternativa 2. Fresado y Recuperación de materiales mezclados con aglutinante(cemento)

Esta alternativa contempla la construcción de una base estabilizada con cemento constituida por el 100% de material de base y carpeta asfáltica, más el 3% de material cementante. Sobre este nivel debe efectuarse el riego de curado con Emulsión afines a la actividad de microfisuración, acompañada de arena de trituración para el buen desempeño y protección de la base estabilizada. Posterior se construirá una carpeta asfáltica de 5.0cm de espesor.

De acuerdo a las modelaciones esta alternativa presenta una vida residual mayor a 20 años, porque se puede esperar que el recuperar el material mejora la resistencia a las deformaciones

permanentes y la reducción de fatiga por agrietamiento en un lapso a largo plazo que indica esfuerzos admisibles mayores a 20 años de servicio.

3.3.2.3 Alternativa de la sección 2 y 3 desde el km 1+100 al km 14+574, carril derecho e izquierdo

Para las abscisas comprendidas entre la 1+100 a 14+574 al haber encontrado que existe daño superficial y comportamiento deficiente de la carpeta asfáltica se estableció que la intervención será a nivel de carpeta asfáltica y refuerzo, por tanto, la alternativa es la siguiente.

Alternativa 1. Fresado, reciclado y reposición de carpeta

Esta alternativa de intervención consiste en realizar el fresado de la capa asfáltica existente en un espesor de 3.00 cm, para posteriormente realizar el sellado de grietas, parcheos y/o bacheos localizados y luego conformar una mezcla asfáltica como capa de rodadura de 5.0cm.

La estrategia de intervención planteada en este apartado se fundamenta en que en estos sectores se requiere una rehabilitación para mejorar la condición superficial del pavimento y el agrietamiento por fatiga expresado en los resultados del capítulo 2. Por lo tanto, con los resultados obtenidos de la modelación mostrada en el anexo 4., se confirma que la intervención soportará los esfuerzos admisibles estipulados en el periodo de vida útil del presente proyecto.

Alternativa 2. Fresado y Recuperación de materiales mezclados con aglutinante(cemento)

Al igual que el análisis de los numerales 3.3.2.2 y 3.3.2.3 la estrategia planteada en esta sección y analizada con el software de IMT-PAVE-ECUADOR (modelación descrita en el anexo 4), se encontró que la intervención soportará los esfuerzos admisibles estipulados en un lapso mayor a 20 años, lo que permite entender que el periodo de vida útil se prolonga y esto significa mayor servicio y confort para el usuario.

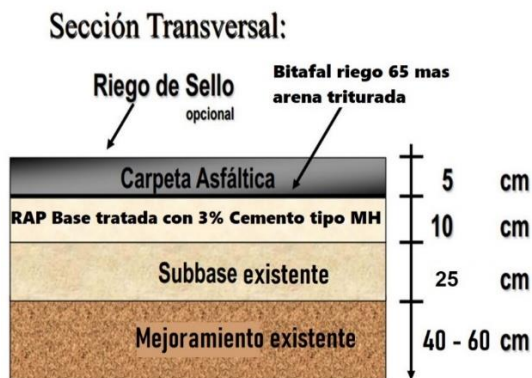
3.3.3 Resumen de Intervenciones propuestas

A continuación, se resumen los análisis efectuados sobre las progresivas en las que se propone las intervenciones, resultados de las modelaciones y análisis efectuados en este trabajo de investigación.

Tabla 18: Resumen de intervención propuesta

Abscisa			
De	Hasta	Carril	Tipo de Intervención
0+000	1+100	Derecho	Carpeta asfáltica de 5 cm, más base estabilizada con cemento 3% del material reciclado de la carpeta asfáltica y base asfáltica existente que suman 10cm.
1+100	14+574	e	
14+574	25+005	Izquierdo	

Figura 48: Esquema de la intervención propuesta para la rehabilitación del tramo Macas-Sinaí (km 0+000 al km 25+005)



Fallas superficiales de la sección 8 (16+000 a 25+000) caracterizadas por piel de cocodrilo acompañado de grietas longitudinales por fatiga y ahuellamiento. **Capítulo IV: Análisis Técnico-Económico-Ambiental**

Con las auscultaciones efectuadas en el tramo Macas Entrada a Sinaí se delimitó la definición de alternativas de rehabilitación, frente a las cuales se realiza un análisis técnico de esfuerzos de fatiga y deformación.

Definir la propuesta de rehabilitación desde el punto de vista económico es el principal factor decisivo para el Estado, por cuanto el rehabilitar en la gran mayoría de casos implica elevados costos de las obras de infraestructura vial debido a la falta de una política de administración vial adecuada.

Parte de este capítulo se enmarca en efectuar la evaluación económica de las alternativas de rehabilitación planteadas, en las que se considera los costos de construcción por la obra de rehabilitación, costos de mantenimiento, costos de operación vehicular, de tiempo de viaje y la accidentalidad.

Por otro lado, aquí también se identifica los efectos sociales y ambientales a los impactos generados por la construcción, operación y mantenimiento de las alternativas de rehabilitación.

Así pues, en los siguientes numerales se efectuará el detalle del análisis económico y análisis socio ambiental de cada una de las alternativas de rehabilitación.

Cabe señalar que las dos alternativas de rehabilitación planteadas en el numeral 3.3.2 son técnicamente adecuadas en razón de que los esfuerzos admisibles se enmarcan en la vida remanente planteada para el diseño de la estructura de pavimento (10 años).

4.1 Análisis técnico

Una vez precisados los espesores de cada capa que compone la estructura de pavimento se procede en primera instancia a examinar el módulo elástico de la capa estabilizada con cemento y de la carpeta asfáltica.

Diseño de la dosificación de estabilización adecuada

Para la dosificación del porcentaje de cemento adecuado para el tramo de investigación se realizaron ensayos de laboratorio sobre los materiales extraídos de carpeta asfáltica y de base asfáltica, en donde se efectuaron mezclas del material mencionado más cemento portland vial de bajo grado de hidratación, en diferentes dosificaciones. La dosificación ideal es aquella que determinó un módulo elástico que se enmarco dentro de las tolerancias de las bibliografías

recomendadas como lo encontrado en la tabla 1-4 de Vasquez Monteros (2016) en Sarango Cueva (2019), para capas estabilizadas con cemento, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 19: Resultados de módulo elástico y resistencia a la compresión del material reciclado agregando 7 % de cemento MH

NÚCLEO N°	UBICACIÓN	Fecha de elaboracion	Fecha de rotura	Edad (días)	Módulo elástico Mpa	Densidad	Diámetro Promedio	Carga kN	Resist. Kg/cm2	Promedio Kg/cm2
1	Material Reciclado de Asfalto (50% Mcarpeta Asfáltica+50%Base Asfáltica)+7% Base Vial	25/02/2021	04/03/2021	7	1898	2,005	151	61,9	35,28	35,63
2								63,2	35,99	
1	Material Reciclado de Asfalto (50% Mcarpeta Asfáltica+50%Base Asfáltica)+7% Base Vial	25/02/2021	25/03/2021	28	2486	2,023	151	76,1	43,32	45,35
2								83,2	47,37	

Tabla 20: Resultados de módulo elástico y resistencia a la compresión del material reciclado agregando 3 % de cemento MH

NÚCLEO N°	UBICACIÓN	Fecha de elaboracion	Fecha de rotura	Edad (días)	Módulo elástico Mpa	Densidad	Diámetro Promedio	Carga kN	Resist. Kg/cm2	Promedio Kg/cm2
1	Material Reciclado de Asfalto (50% Mcarpeta Asfáltica+50%Base Asfáltica)+3% Base Vial	25/02/2021	04/03/2021	7	1512	1985,000	151	27,2	15,50	18,50
2								37,8	21,50	
1	Material Reciclado de Asfalto (50% Mcarpeta Asfáltica+50%Base Asfáltica)+3% Base Vial	25/02/2021	25/03/2021	28	1868	2003,000	151	43,0	24,50	27,50
2								53,6	30,50	

Características granulométricas de la carpeta asfáltica y base asfáltica

En base al muestreo de las capas asfálticas encontradas en el proyecto, a estas se efectuó las características granulométricas encontrando lo siguiente.

Tabla 21: Resultados granulométricos de las capas asfálticas

Absc:0+035 Absc:5+550 Absc:21+200 Absc:24+550

GRAVA	28 %	30 %	66 %	81 %
ARENA	66 %	65 %	30 %	15 %
FINOS	6 %	5 %	4 %	4 %

Dosificación

50% de material de carpeta asfáltica y 50% de material de base asfáltica + 3% de Cemento Vial MH.

Concreto asfáltico (Mezcla densa en caliente)

Para el módulo elástico dinámico del concreto asfáltico se establece un valor de 3000MPa, junto a una relación de Poisson de 0.35.

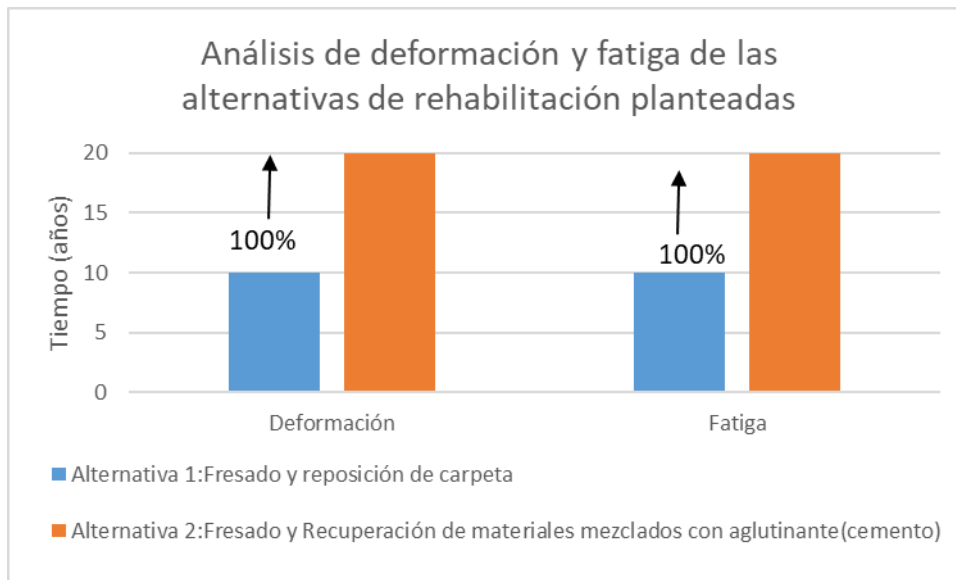
La determinación del módulo elástico dinámico del concreto asfáltico se consideró en base a una mezcla densa en caliente con porcentajes de vacíos de 5.0% con temperatura de la mezcla (T_{mix} de aproximadamente 20°C) y con frecuencia de aplicación de la carga de 10Hz para velocidades de operación de los vehículos de 60km/h (Ministerio de Transporte y Obras Publicas, 2002).

Esfuerzos admisibles

Tomando las alternativas de rehabilitación se procedió a comparar con el método mecanicista (semiempírico) los esfuerzos de cada uno de los modelos de las estructuras de pavimento, como lo es, la estrategia con propuestas convencionales (fresado y reposición de carpeta asfáltica) y la estabilizada (reciclado de material y colocación de carpeta asfáltica), a fin de verificar los esfuerzos y deformaciones que sufren en el periodo de vida útil.

La modelación de las estructuras de pavimento en los numerales 3.3.2.1 al 3.3.2.3 se realizó mediante la metodología empírico-mecanicista, la cual se basa en un modelo teórico para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones elásticas, con el objetivo de predecir la respuesta del pavimento causada por una carga estándar aplicada. De esta manera a continuación se realiza una comparación de las dos alternativas analizadas.

Figura 49: Comparación de alternativas de rehabilitación en cuanto a la resistencia de esfuerzos en el período de vida útil.



De la figura 49. Se observa que los esfuerzos descritos con las leyes de fatiga del concreto asfáltico nuevo y las propiedades de los materiales locales empleados se encontró que el comportamiento del diseño para el periodo de vida útil llega a una vida útil de 10 años, mientras que con la propuesta de fresado y recuperación de materiales mezclados con aglutinante (cemento), la estructura de pavimento tiene una vida remanente mayor a los 20 años, que representa mayor durabilidad de la estructura de pavimento y *por tanto la Entidad no deberá realizar actividades de carácter estructural porque con la alternativa 2 se contrarresta la fatiga y deformación generada por las condiciones ambientales y la carga de tráfico.*

4.2 Análisis ambiental

El Análisis Ambiental de las alternativas propuestas suministra a los ejecutores la forma en como las acciones planteadas en la construcción y mantenimientos de cada alternativa impactan al ambiente. Este impacto fue analizado en el software paLATE v2.2 en donde evaluaron el ciclo de vida del pavimento frente a los efectos ambientales.

A través de este análisis se evaluó, todo aquello que se consume o se utiliza sobre la generación de las etapas de pavimentación de las vías, en la cual se tuvo en cuenta, los insumos que se

utilizan en el proceso de producción de la obra, la demanda de recursos naturales y uso de maquinaria (Viloria Villegas, Cadavid, Awad).

De acuerdo a Santos , Bryce , Flintsch, Ferreira , y Diefenderfer , 2015 Las etapas del ciclo de vida se enmarcan en:

- Extracción y producción de materiales.
- Transporte.
- Construcción y mantenimiento y rehabilitación.
- Manejo de la zona de trabajo.
- Uso.
- Finalización de la vida útil.

Al identificar las diferentes alternativas de mantenimiento y rehabilitación se estimó la cuantificación de volúmenes que se requieren por cada actividad y a continuación se procedió a evaluar el impacto ambiental que genera tanto la zona de trabajo como el transporte, razón por la cual por cada alternativa evaluó los volúmenes de materiales y transporte que requieren en la construcción. Así mismo, se considera, la cantidad y transporte de material para un número de eventos de mantenimiento.

Con las propuestas de intervención planteadas en el apartado 3.3.3, ha permitido cuantificar la maquinaria y equipos que requieren utilizar por cada alternativa.

En ese sentido, a continuación, se muestra los resultados encontrados por cada alternativa para el análisis de cada kilómetro intervenido.

Figura 50: Consumo de energía total de las estrategias de intervención.

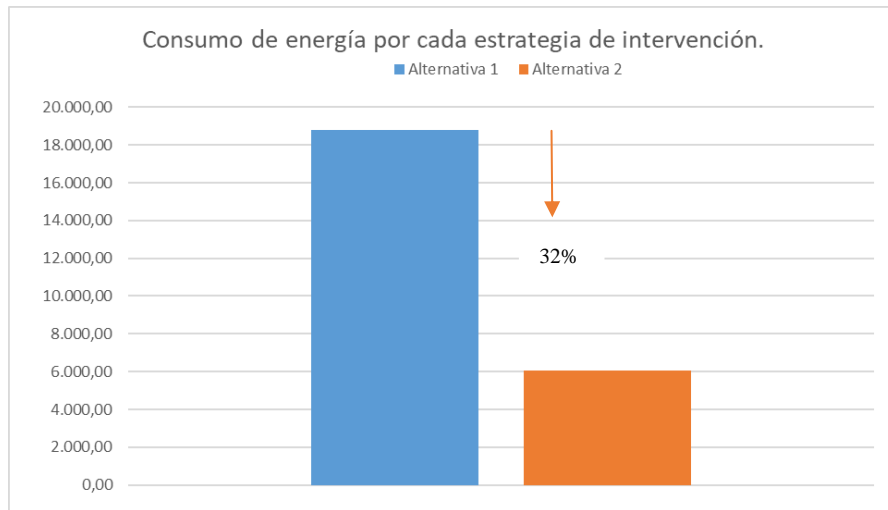
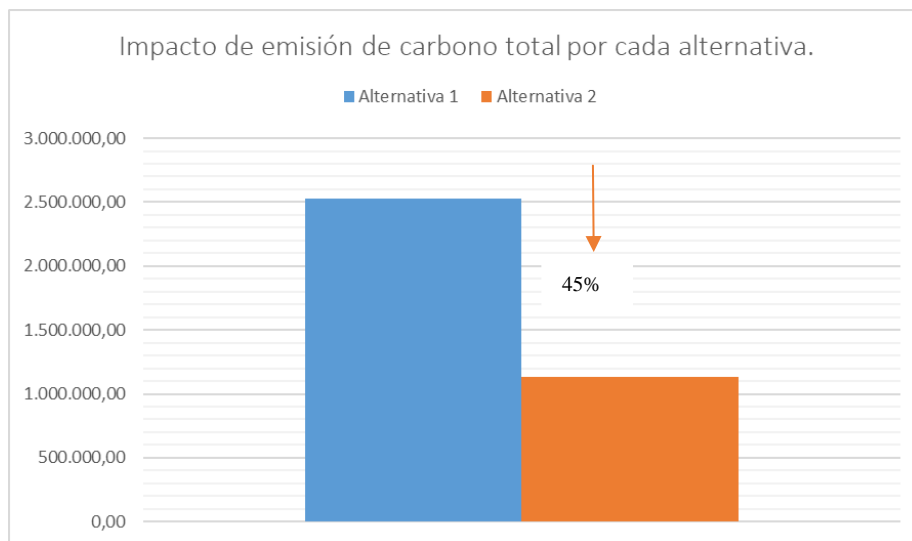


Figura 51: Emisiones de carbono total de las estrategias de intervención.



De la figura 50 y 51, se observa que durante el periodo del proyecto el flujo de energía de la Alternativa 1 (caja azul): Fresado y reposición de carpeta, presenta un alto impacto respecto a la Alternativa 2: Fresado y Recuperación de materiales mezclados con aglutinante (cemento), debido a la extracción de materiales crudos disponibles en la naturaleza como lo es material pétreo y betún asfáltico. En tanto, la Alternativa 2 (caja naranja) muestra una significativa reducción de la energía debido al reciclado de los materiales existentes, puesto que no necesitan ser retirados y trasladados de una fuente de material a la zona de trabajo. Así también, esta alternativa disminuye el impacto de emisiones de carbono de toda la producción de la maquinaria

que se ocupen en la construcción de un RAP (reciclaje), por ende, reduce el efecto invernadero de las emisiones a la atmósfera.

Por lo que, con el análisis se confirma que el uso de materiales estabilizados (Alternativa 2) con los insumos tomados de la estructura de pavimento existente reducen el 32% de la energía utilizada y 45 % de las emisiones de gas a la atmosfera , frente a la tecnica de rehabilitacion tradicional (Alternativa 1). De este modo la alternativa dos (2), en términos generales reduce la huella de carbono ambientalmente.

4.3 Análisis económico

En el presente análisis económico se contempla el presupuesto general de construcción y obras de mantenimiento, por cada alternativa planteada en el capítulo 3, para finalmente realizar una comparación sobre la división del costo total para la longitud a intervenir en cada propuesta.

Costos por obra de construcción

Para la elaboración de los costos económicos de cada alternativa planteada en el numeral 3.3.2, tuvieron en cuenta las condiciones actuales del mercado y las distancias de acarreo de transporte de los materiales al centro de gravedad del proyecto de construcción. Finalmente, en las tablas tabla 22 y 23 resumen el presupuesto *requerido por kilómetro* por cada alternativa.

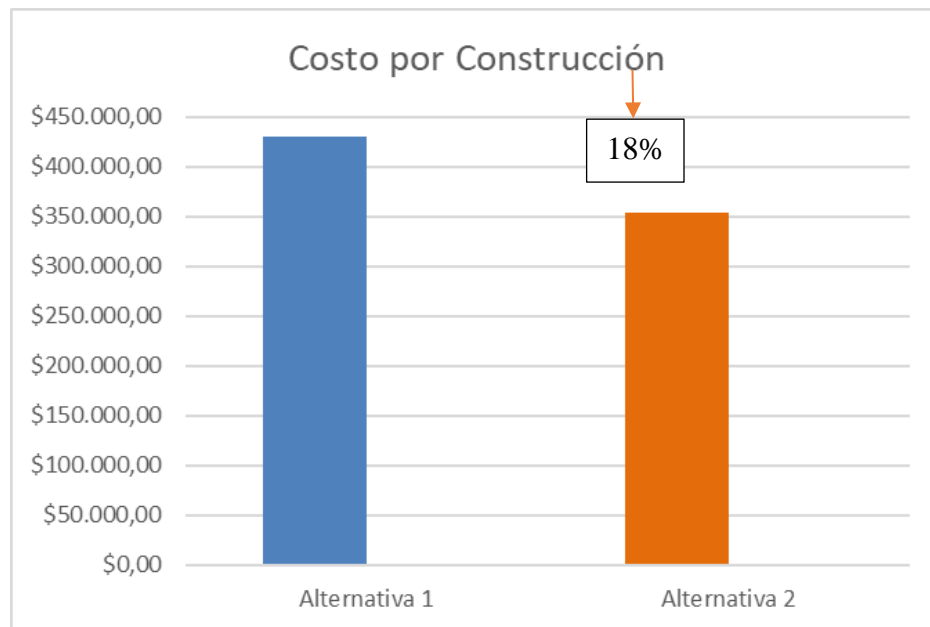
Tabla 22: Presupuesto referencial de construcción - Alternativa 1 (Fresado y reposición de carpeta)

Item	DESCRIPCION (MOP - 001- F)	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
406-8	Fresado de pavimento asfaltico	m3	530,00	\$16,17	\$8.570,10
309-6E	Transporte de desalojo de hormigón asfaltico distancia ≥ 5 ≤ 10	m3-km.	5.300,00	\$0,40	\$2.120,00
MR-113	Bacheo asfáltico en caliente (Bacheo mayor para cuando se requiere colocación de capas superiores) Incl. Transporte	m2	1.060,00	\$176,42	\$224.406,24
MR-111	Bacheo asfáltico en caliente (Bacheo Menor porque la reparación es a mano y en áreas pequeñas)	m3	1.272,00	\$38,60	\$40.916,00
MR - 001 E 2a	Resanado de fisuras (Grietas Mayores Selladas con Asfalto) (3-10) cm	M	400,00	\$7,68	\$3.070,80
406-1a E	Geogrilla de Fibra de vidrio para Pavimentación y Repavimento	m2	1.590,00	\$6,21	\$9.873,90
405-5 (1)	Capa de rodadura de hormigón asfáltico mezclado en planta (Recapeo de la vía de 7.5 cm)	m3	795,00	\$167,64	\$133.273,80
309-6(4)E	Transporte de mezcla asfáltica para capa de rodadura (Distancia de transporte 20 - 50 km)	m3-km.	23.850,00	\$0,33	\$7.870,50
TOTAL					\$430.101,34
Costo de construcción por kilómetro:					\$430.101,34

Tabla 23: Presupuesto referencial de construcción - Alternativa 2 (Fresado y Recuperación de materiales mezclados con aglutinante(cemento))

Item	DESCRIPCION (MOP -001-F)	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
406-8	Fresado de pavimento asfáltico	m3	530,00	\$16,17	\$8.570,10
403-2(1) E	Estabilización de base del material reciclado de base asfáltica y carpeta asfáltica con cemento (3%)	m3	1.060,00	\$36,23	\$38.403,80
	Curado con emulsión BITAFAL RIEGO 65 y arena de trituración	m2	10.600,00	\$20,00	\$212.000,00
405-5 (1)	Capa de rodadura de hormigón asfáltico mezclado en planta (Recapeo de la vía 5.00 cm)	m3	530,00	\$167,64	\$88.849,20
309-6(4)E	Transporte de mezcla asfáltica para capa de rodadura (Distancia de transporte 20 - 50 km)	m3-km.	15.900,00	\$0,33	\$5.247,00
TOTAL					\$353.070,10
Costo de construcción por kilómetro:					\$353.070,10

Con la estimación de los presupuestos de construcción en cada alternativa **por kilómetro de intervención**, encontraron que la reducción en porcentaje (%) entre la alternativa convencional (alternativa 1) y la estabilizada (alternativa 2) es del 18% que en costo monetario equivale a \$77.031,24 (*Setenta y siete mil treinta y uno con 24/100 dólares americanos*), tal como se observa en la figura

Figura 52: Presupuesto referencial de mantenimiento de las alternativas planteadas.

La alternativa 2, resultó la más conveniente desde el punto de vista económico, por la utilización y optimización de materiales en situ, ya que no es necesario el transporte de material. La reutilización y reciclado (RAP) garantiza la eliminación de toda fisura en las capas intermedias, es decir no existe actividad de bacheo.

Por otro lado, es importante notar que la alternativa 1 requiere que realicen resaneos (bacheos menores y mayores) previos sobre la capa de base asfáltica, porque antes de la colocación de la capa de refuerzo deben garantizar la impermeabilización, lo cual incrementa las actividades de construcción.

Costos por obra de mantenimiento

Los costos por mantenimiento están relacionados con las actividades experimentadas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en la red Estatal sobre el pavimento, con lo cual, en la tabla 24 y 25 se enuncian los presupuestos referenciales por mantenimiento.

Tabla 24: Presupuesto referencial de mantenimiento - Alternativa 1

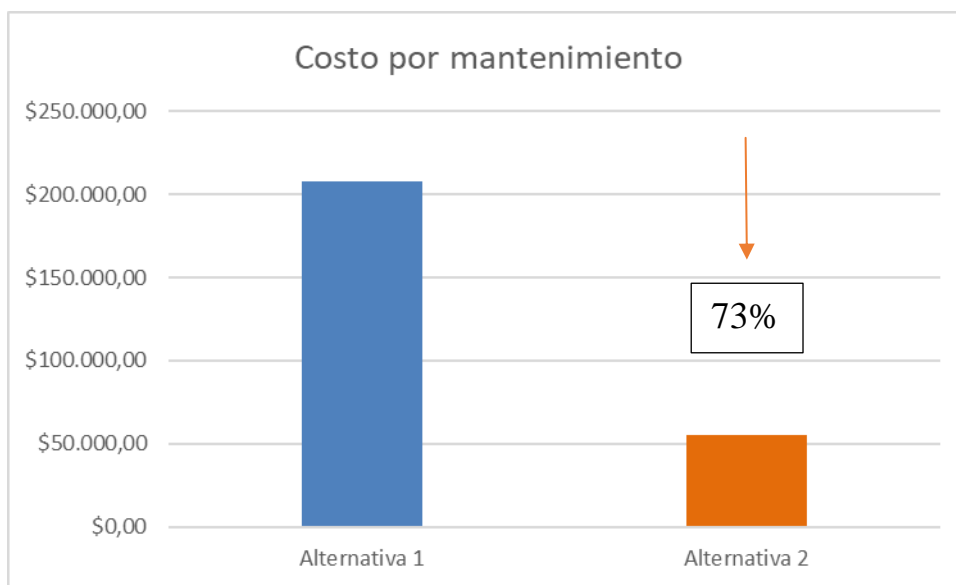
Item	DESCRIPCION (MOP -001-F)	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
MR-122.E	Sellado de fisuras superficiales	m	300,00	\$0,51	\$153,00
MR-111	Bacheo asfáltico en caliente (Bacheo Menor)	m3	954,00	\$176,42	\$168.304,68
406-8	Fresado de pavimento asfáltico	m3	265,00	\$16,17	\$4.285,05
309-6E	Transporte de desalojo de hormigón armado distancia $\geq 5 \leq 10$	m3-km.	2.650,00	\$0,40	\$1.060,00
MR - 001 E 2a	Resanado de fisuras (Grietas Mayores Selladas con Asfalto) (3-10) cm	m	120,00	\$7,68	\$921,24
406-1a E	Geogrilla de Fibra de vidrio para Pavimentación y Repavimento	m2	795,00	\$6,21	\$4.936,95
405-5 (1)	Capa de rodadura de hormigón asfáltico mezclado en planta (Recapeo de la vía)	m3	159,00	\$167,64	\$26.654,76
309-6(4)E	Transporte de mezcla asfáltica para capa de rodadura (Distancia de transporte 20 - 50 km)	m3-km.	4.770,00	\$0,33	\$1.574,10
Costo de mantenimiento por kilómetro:					\$207.889,78

Tabla 25: Presupuesto referencial de mantenimiento - Alternativa 2

Item	DESCRIPCION (MOP -001- F)	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
MR-122.E	Sellado de fisuras superficiales	M	400,00	\$0,51	\$204,00
MR-111	Bacheo asfáltico en caliente (Bacheo Menor)	m3	95,40	\$176,42	\$16.830,47
405-7.2 E	Micro-Pavimento Asfáltico Tipo II ó III (Micro- Surface)	m2	5.350,00	\$7,20	\$38.520,00
Costo de mantenimiento por kilómetro:					\$55.554,47

Comparando los resultados de la tablas 24 y 25, la diferencia del costo por mantenimiento por kilómetro entre ambas alternativas es de \$ \$152.335,31 (*Ciento cincuenta y dos mil trescientos treinta y cinco con 31/100 dólares americanos*), que equivale a una tasa de 73% de reducción en costo por mantenimiento al adoptar la alternativa 2 respecto de la 1, que gráficamente se visualiza en la imagen siguiente.

Figura 53: Presupuesto referencial de mantenimiento de las alternativas planteadas.



De los observado en la figura 53, la alternativa 1 muestra mayor inversión en mantenimiento, debido a las posibles filtraciones en el resaneo de baches y fisuras que se realizaron en la etapa

de construcción, estas se reflejarán a la superficie con mayor intensidad, lo que generaría mantenimientos más frecuentes de los previstos, por el deterioro y rigidez de la mezcla asfáltica antigua con la nueva. Por el contrario, la alternativa 2, únicamente enfoca su mantenimiento en sellado de fisuras y en casos excepcionales bacheos menores, situación que se da por el reciclado y estabilización de la capa de base, en donde esta capa aumenta sus propiedades de impermeabilización, resistencia mecánica, de plasticidad, y es estable ante los procesos de meteorización bajo las condiciones climáticas como las de la amazonia.

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusión respecto del objetivo general

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo investigativo se determina que el material reciclado con base estabilizada por sí solo no permite un buen desempeño de la estructura, si no que hace falta que se efectuó un mantenimiento rutinario y constante.

La evaluación funcional y estructural del tramo estudiado, evidencia que la carpeta asfáltica se encuentra fatigada y deformada como consecuencia de las cargas vehiculares.

El reciclaje de las materiales in situ reduce los impactos ambientales y es una práctica muy eficiente de rehabilitación de vías, porque disminuye la explotación, transporte y disposición de materiales, abaratando costos y tiempo.

En el aspecto económico al incorporar la optimización de los materiales granulares en la construcción de esta vía existe un ahorro del 18% que equivale a \$77.031,24 (*Setenta y siete mil treinta y uno con 24/100 dólares americanos*), y en mantenimiento un ahorro de 46%, que equivale a \$115.255,64 (*Ciento quince mil doscientos cincuenta y cinco con 64/100 dólares americanos*).

Entonces, se concluye que el análisis técnico económico de la alternativa 2 favorece la optimización de la estrategia de rehabilitación porque enfrenta de forma favorable la resistencia a los esfuerzos admisibles a los que está sometida la estructura de pavimento en la red vial, con una vida residual mayor al periodo de vida útil previsto; además de que se comporta de acuerdo a su modelo de deterioro en condiciones ambientales poco predecibles debido a la intensidad de épocas lluviosas y al limitado mantenimiento de quien la administra. Igualmente, se reducen los impactos negativos en el medio ambiente como emisiones de carbono, y costos elevados de inversión en construcción y mantenimientos frente a la alternativa 1 que propone fresado y reposición de carpeta.

5.2 Conclusión respecto del objetivo específico 1

El paquete estructural existente en el tramo Macas – Sinaí, en la mayoría de los tramos se componen de una capa de pedraplén que va en un rango de 40 a 60 cm; una base granular que fluctúa de 18 a 25 cm; la base asfáltica de 5 a 7 cm y la carpeta asfáltica de 6 a 7 cm. Lo que evidencia que existe una base de soporte adecuada para cualquier tipo de diseño de pavimento en la vía objeto de investigación.

5.3 Conclusión respecto del objetivo específico 2

La carpeta asfáltica en el tramo Macas – Sinaí, requiere ser intervenida para mejorar las condiciones de serviciabilidad y confort del usuario de la vía; puesto que presenta un desgaste en las secciones homogéneas lado derecho e izquierdo presentando un comportamiento de regular a malo.

5.4 Conclusión respecto del objetivo específico 3

Comparando la metodología de base asfáltica reciclada con cemento y la metodología tradicional, para rehabilitar el tramo Macas – Sinaí se establece que, las dos alternativas cumplen con el periodo de diseño planteado (mayor a 10 años). Sin embargo, al cuantificar los costos monetarios tanto en construcción como en mantenimiento se determina que la alternativa dos que corresponde al reciclado de material existente, más la colocación de una carpeta asfáltica, es la más conveniente en relación a costos; además genera menores cargas ambientales, reduce la demanda de energía y emisión de gases efecto invernadero, conserva el recurso material, evita el desecho de materiales existentes en la obra de infraestructura, reducción de ruidos, preservación de la fuentes de materiales en ríos. Por lo que se concluye que la alternativa de base asfáltica reciclada con 3% cemento es la más sostenible desde el punto de vista ambiental; ya que se reduce el 32% de energía y 44 % de emisiones de gas a la atmosfera.

5.5 Recomendación respecto del objetivo general

Debido a los elevados costos de las obras de infraestructura vial y la limitación de los presupuestos para ejecutarlos, se recomienda a las entidades ejecutoras que, cuenten con un ingeniero de conservación quien apenas observe fisuras en la carpeta asfáltica, estas sean corregidas inmediatamente, con el objeto de evitar filtraciones hacia las capas intermedias. Además, efectúen análisis más exhaustivos para la elección de alternativas de rehabilitación, con el objetivo de esquematizar el mantenimiento y reparación en base del conocimiento, lecciones aprendidas y experiencia para la selección de una estrategia de rehabilitación adecuada.

5.6 Recomendación respecto del objetivo específico 1

Con la amplia gama de equipos y herramientas de análisis para la evaluación de pavimentos que existe en la actualidad, la experiencia y criterio del ingeniero experto es irremplazable al momento

de interpretar la información recolectada y decidir qué acciones tomar para rehabilitar o preservar los pavimentos.

5.7 Recomendación respecto del objetivo específico 2

Se recomienda que cuando la propuesta de la alternativa 2, sea implementada en la red estatal E45 tramo Macas – Sinaí, se efectúe evaluaciones y auscultaciones periódicas al menos cada 3 años a efectos de verificar el modelo de deterioro estimado en los diseños de pavimentos y efectuar ajustes en las programaciones de las intervenciones correctivas si el tramo vial lo advierte.

5.8 Recomendación respecto del objetivo específico 3

Un proyecto de rehabilitación no solamente debe enfocarse en la parte técnica y económica, porque más allá de los análisis se recomienda preservar el medio ambiente y proteger los recursos naturales; así pues, en la medida en que se consiga la reutilización de los materiales, se prescindirá de la extracción de material aluvial desde ríos y de canteras. Por consiguiente, se reducirá la contaminación por emisiones de gases generados por el transporte, el consumo de combustible, ruido y polvo. Y en el caso de la extracción de material en los cauces podrían afectar la estabilidad de los taludes de las márgenes de los ríos.

5.9 Recomendaciones de futuras investigaciones

Se recomienda realizar líneas de investigación de modelos predictivos de deterioro del pavimento con la toma de datos por épocas del año en el tramo vial donde se ha colocado estabilizaciones con cemento, mediante ensayos no destructivos (deflectómetro de impacto o en un nivel más bajo, u/o con geogauge) a fin de establecer comportamiento del pavimento por mes. Esta data permitirá crear y medir el comportamiento del pavimento sobre las condiciones medioambientales, tránsito, velocidades de operación y materiales, para que con esta información se elaboren modelos que sirvan de base para el diseño y extrapolación de datos en vías con similares condiciones. En este ítem se propone investigar modelos de deterioro para los pavimentos que permitan ser más asertivos al periodo de vida útil para los que se diseñan, ya que el deterioro de los pavimentos se sujeta a múltiples variables como lo son: el diseño de la geometría de la vía (pendiente, cunetas, drenaje, sumideros, etc), el diseño de la estructura de pavimento, calidad de los agregados y del asfalto, mantenimiento vial y condiciones

medioambientales. Los modelos de deterioro que se formulen no deberían incorporar los sitios que se considera críticos o inestables, por cuanto, son sitios que deben realizarse obligatoriamente análisis que enfoquen puntos de vista geológico, geotécnico y/o hidráulico-hidroológico de forma particular.

Referencias

- Ali, N., & Khosla, N. (1987). DEtermination of layer moduli using a falling weigth deflectometer. *Transportation research record*, 1-10.
- Arce, M. (2011). Programa de Infraestructura del Transporte. *Bases estabilizadas con cemento*. San Jose de Costa Rica, San Jose de Costa Rica, Costa Rica: Unidad de Capacitacion y Transferencia Tecnológica PITRA. Recuperado el 17 de 03 de 2021, de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/368/20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arteaga Villamarin, J. (2018). Análisis del Comporamiento de la Base-Cemento para pavimentos con adición de residuos PET Reciclado. *Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil*. Bogotá, Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil. Recuperado el 05 de 04 de 2021, de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16406/1/DOCUMENTO-ANALISIS%20DEL%20COMPORTAMIENTO%20DE%20LA%20BASE%20%20CEMENTO%20PARA%20PAVIMENTOS%20CON%20ADICION%20DE%20RESIDUOS%20PET%20RECICLADO.pdf>
- Ballesteros Santos, L., & Benavides Ladino, Y. (14 de 09 de 2021). Evaluación y análisis de deterioros en pavimentos asfálticos mediante la metodología VIZIR – INVIAS 2013 sobre el tramo k5+000 al k 7+000 de la vía los Municipios de Melgar-Icononzo (Tolima). *Proyecto para exhibir y obtener el diploma de Ingeniero Civil*. (U. P. Magdalena, Ed.) Giradot, Cundinamarca, Colombia. Obtenido de <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5699/EVALUACI%C3%93N%20Y%20CLASIFICACI%C3%93N%20DE%20DETERIOROS%20EN%20PAVIMENTOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Beltrán Calvo , G., & Romo Organista , M. (03 de 2013). Evaluación de pavimentos y decisiones de conservación con base en sistemas de inferencia difusos. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 15(3), 10. Recuperado el 5 de 03 de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432014000300006
- Castillo, L. (7 de 10 de 2017). *86 millones al año gasta el Estado en mantenimiento vial*. Recuperado el 15 de 03 de 2021, de El Comercio: <https://www.elcomercio.com/actualidad/inversion-ecuador-mantenimientovial-derrumbes-invierno.html>
- Cedeño Plaza, D. G., & Ávila Armijos, J. C. (2013). Investigación de la estabilización de suelos con enzima aplicado a la sub-rasante de la Avenida Quitumbe - Ñan, Cantón Quito. En J. C. Ávila Armijos, & D. G. Cedeño Plaza, *Trabajo de Graduación previo la obtención del Título de Ingeniero Civil* (pág. 217). Quito: Carrera de Ingeniería Civil. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2201>
- CEPAL. (1985). La Industria del Cemento en la Region Latinoamericana y del Caribe: Evolución, situación actual, y perspectivas del desarrollo tecnológico. *Comisión Económica para America Latina y el Caribe*, 4-9.
- Di Denis Venturi. (15 de 11 de 2008). Medio Ambiente. *En Australia, las carreteras están hechas con tóner usado*. (E. e. S.R.L., Ed.) París, París, Francia.
- Gobierno Constitucional del Ecuador. (11 de 2006). Plan Maestro de Vialidad. *Plan Maestro de Vialidad*. Quito, Pichincha, Ecuador: Mop. Recuperado el 5 de 03 de 2021, de Plan Maestro de Vialidad
- Gonzalez Herrera, D. (07 de 2013). Propuesta de una guía de rehabilitación de pavimentos flexibles mediante el reciclaje in situ en frio. *Trabajo técnico*. Universidad de lo Andes. Obtenido de

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/12072/u670639.pdf?sequence=1>

Guaranda Mero, B. (10 de 2017). *Proyecto de Investigación previo la obtención del Título profesional de Ingeniero Civil*. Jipijapa, Manabí, Ecuador: Universidad Estatal del Sur de Manabí. Recuperado el 19 de 02 de 2021, de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiEi4SsjLPvAhUip1kKHd5TBEgQFjAAegQIARAD&url=http%3A%2F%2Frepositorio.unesum.edu.ec%2Fbitstream%2F53000%2F804%2F1%2FUNESUM-ECU-CIVIL-2017-04.pdf&usg=AOvVaw3Q5zfM5ZKtmTb>

Guerra, S. (7 de 10 de 2020). *Inversión pública en 2020 depende de financiamiento incierto*. Recuperado el 12 de 03 de 2020, de Primicias: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/inversion-publica-fuentes-financiamiento-ecuador/>

Herra, D. (2018). Bases estabilizadas con cemento y su importancia en el desarrollo vial costarricense. *Blog LanammeUCR*, 1(1), 1. Recuperado el 23 de 03 de 2021, de <https://bloglanammeucr.wordpress.com/2019/04/09/bases-estabilizadas-con-cemento-y-su-importancia-en-el-desarrollo-vial-costarricense/>

Herra-Gómez, L., Guerrero-Aguilera, S., Loría-Salazar, L., Salas-Chaves, M., Sequeira-Rojas, W., & Oviedo-Lorío, B. (2019). Guía para inspectores para la construcción de bases estabilizadas con cemento. *Unidad de Auditoría Técnica-LanammeUCR*, 1-60. Recuperado el 14 de 02 de 2021, de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1435>

Higuera, C. H. (2015). *Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos*. Colombia: Escuela de Colombia de Ingeniería.

- Horak, E. (s/f de 06 de 2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering of the University of Pretoria*, 50(2), págs. 2-9. Recuperado el 23 de 09 de 2021, de <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaice/v50n2/01.pdf>
- Horak, E., Emery, S., & James, M. (Agosto de 2015). Review of falling Weight Deflectometer Deflection Benchmark Analysis on Roads and Airfields. *Conference on Asphalt Pavements Southern African (CAPSA) SunCity*, 10. Recuperado el 03 de 03 de 2021, de https://www.researchgate.net/publication/276936321_Review_of_falling_Weight_Deflectometer_Deflection_Benchmark_Analysis_on_Roads_and_Airfields_Accepted_for_Conference_on_Asphalt_Pavements_Southern_African_CAPSA_SunCity_August_2015
- Huang, S.-C., & Benedetto, H. (Edits.). (2015). *Advances in Asphalt Materials*. New York, USA: Elsevier Ltd. doi:<https://doi.org/10.1016/C2014-0-02666-4>
- INAMHI, SENAGUA. (08 de 2017). *Servicio Meteorológico del Ecuador*. Recuperado el 24 de 03 de 2021, de http://www.serviciometeorologico.gob.ec/gisweb/TIPO_DE_CLIMAS/PDF/TIPOS_CLIMAS_A_ECUADOR_2017.pdf
- Instituto Mexicano del Transporte y Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1992). Análisis de los coeficientes de daño unitarios correspondientes a los vehículos autorizados en la Red Nacional de Carreteras. *Publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte* (5), 1-33. Recuperado el 23 de 09 de 2021, de <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt5.pdf>
- Instituto Nacional de Vías. (2008). *Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras* (Segunda ed.). Bogotá: Instituto Nacional de Vías. Recuperado el 03 de 04 de 2021

- Lazo Lázaro, G. (s/f de 08 de 2018). Evaluación del Diseño de Pavimentos Estabilizados con Emulsión Asfáltica y Cemento Portland para el Proyecto de Conservación Vial Puno Tacna Tramo Tarata-Capazo-Mazocruz. *Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil*. Lima, Lima, Perú: Universidad San Ignacio de Loyola, Facultad de Ingeniería. Recuperado el 16 de 03 de 2021, de <http://repositorio.usil.edu.pe/handle/USIL/3786>
- Leiva, F., Perez, E., & Aguilar, J. y. (2017). Modelo de deformación permanente para la evaluación de la condición del pavimento. *Rev. ing. constr. [online]*, 32, 37-46. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000100004>.
- Marchan Moreno, R. (24 de 02 de 2005). Métodos de Rehabilitación en Pavimentos. *Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil*. México, Mexico, Mexico: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Recuperado el 1 de 03 de 2021, de <https://topodata.com/wp-content/uploads/2019/09/METODOS-DE-REHABILITACION-EN-PAVIMENTOS-MARCHAN-MORENO-RUFINO-MARIO-min.pdf>
- Matute Acuario, A. C. (12 de 09 de 2016). Trabajo de Titulación previo a la Obtención del Grado Académico de Ingeniero Civil. *Comparación técnico económica del uso de bases granulares y bases estabilizadas con cemento, para diversos casos de tráfico, con y sin capa de rodadura, para nuestro medio*, 88. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil. Recuperado el 14 de 03 de 2021, de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/6629/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-166.pdf>
- Mendez Roja, C., & Ramirez Angulo, H. (2017). Diseño y Rehabilitación de la Estructura de pavimento de un tramo de la vía terciaria Coello a la Vereda Llano de la Virgen, Localizada en el Municipio de Coello-Departamento de Tolima. *TRabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Diseño y Construcción de Pavimentos*. Bogotá, Bogotá, Colombia: Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad

de Ingeniería. Recuperado el 19 de 02 de 2021, de https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15405/2/2019_diseno_rehabilitacion_estructura.pdf

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. Quito: MOP-001-F-2002.

Ministerio de Obras Públicas de República Dominicana. (s.f.). Identificación de Fallas en Pavimentos y Técnicas de reparación. *Catálogo de Fallas*. República Dominicana, República Dominicana: Depto. Administración y Evaluación De Pavimentos. Obtenido de <https://www.mopoc.gob.do/media/2335/sistema-identificacion-fallas.pdf>

Moreno Ponce , L., Parrales Cantos, G., Cobos Lucio, D., Cordero Garcés, M., Peralta Delgado, J., Ponce Reyes, F., & Baque Campozano, B. (2018). Mantenimiento y Conservación de Carreteras. *Ingeniería y Tecnología, Primera edición*. doi:<http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2018.28>

Murillo Vázquez, E. (2010). Estudio del comportamiento de las bases de pavimentos rígidos en la ciudad de Cuenca y su influencia en el diseño. En E. X. Murillo Vázquez, *Tesis para obtener el título de la Maestría en Geología Aplicada y Geotecnia* (pág. 190). Cuenca: Facultad de Ingeniería. Obtenido de dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/2580/1/tm4332.pdf

Navarro Batallas , W. (05 de 2016). Modelo de Gestión de Conservación vial para la Red Vial. *Disertación previa a la obtención del Título de Magister en Ingeniería Vial en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador*, 260. Quito , Pichincha, Ecuador: Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Recuperado el 03 de 04 de 2021, de [http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/12450/MODELO%20DE%20GESTION%20DE%20CONSERVACION%20VIAL%2c%20PARA%20LA%20RED%20VIAL%](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/12450/MODELO%20DE%20GESTION%20DE%20CONSERVACION%20VIAL%2c%20PARA%20LA%20RED%20VIAL%20)

20RURAL%20DEL%20CANTON%20SANTO%20DOMINGO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

OCDE/CAF/CEPAL. (2018). Instituciones para aprovechar las oportunidades del futuro: hacia mejores empleos y mayor bienestar en América Latina y el Caribe. En OCDE/CAF/CEPAL, *Perspectivas económicas de América Latina 2018: Repensando las instituciones para el desarrollo* (págs. 203-238). París: Éditions OCDE. Recuperado el 23 de 08 de 2021, de <http://dx.doi.org/10.1787/leo-2018-es>

Ochoa Fernando, W. (20 de 08 de 2020). *Video tutorial elaboracion matriz de Leopold*. Ochoa Fernando, Willy Fernando. Recuperado el 10 de 04 de 2021, de <https://www.youtube.com/watch?v=gbBdXC66Jsl>

Restrepo Sierra, H. A., & Stephens Zapata, S. A. (31 de 06 de 2015). Estudio de las ventajas económicas del reciclaje en frío in situ de pavimentos asfálticos. *Monografía para optar por el título de Especialista en Vías y Transporte*, 1-86. (E. e. Transporte, Ed.) Medellín, Medellín, Colombia: Especialización en Vías y Transporte. Recuperado el 23 de 08 de 2021, de <https://core.ac.uk/download/pdf/51196278.pdf>

Restrepo Sierra, H., & Stephens Zapata, S. (2015). Reciclaje de Pavimentos. *Estudio de las ventajas económicas del reciclaje en frío in situ de pavimentos asfálticos*, 86. Medellín, Medellín, Colombia: Universidad de Medellín. Recuperado el 15 de 01 de 2021, de <https://core.ac.uk/download/pdf/51196278.pdf>

Rodríguez Mineros, C. E., & Rodríguez Molina, J. A. (2004). Evaluación y Rehabilitación de Pavimentos Flexibles por el método del reciclaje. *Tesis para optar el título de Ingeniero Civil*. Obtenido de http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2234/1/Evaluaci%C3%B3n_y_rehabilitaci%C3%B3n_de_pavimentos_flexibles_por_el_m%C3%A9todo_del_reciclaje.pdf

- Rodríguez Velásquez, E. (2009). Cálculo del Índice de condición del pavimento flexible en la Av. Luis Montero, Distrito de Castilla. En E. D. Rodríguez Velásquez, *Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil* (pág. 167). Piura: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura. Obtenido de Repositorio digital: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1350/ICI_180.pdf
- Rodríguez, M., Thenoux, G., & González, Á. (2016). Determinación probabilística del tiempo de servicio de Estructuras de Pavimentos. *Revista ingeniería de construcción*. Santiago de Chile, Santiago, Chile: Revista ingeniería de construcción. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000200002>
- Rojas Quintero, L. M. (2014). *Evaluación del módulo resiliente y deformación permanente en material arcilloso con presencia de material friccionante*. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana de la Facultad de Ingeniería Civil. Recuperado el 5 de Marzo de 2018, de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/15059/RojasQuinteroLauraMarcela2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Santos, J., Bryce, J., Flintsch, G., Ferreira, A., & Diefenderfer, B. (2015). A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices. *Structure and Infrastructure Engineering: Management, Life-Cycle Design and Performance*, 11(9), 1199-1217. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2014.945095>
- Sarango Cueva, G. (21 de 07 de 2019). Estabilización de capas granulares para construcción y mantenimiento vial con organosilanos. *Trabajo de Investigación previo a la obtención del Título de Master en Geotecnia Aplicada*. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Central del Ecuador. Recuperado el 18 de 03 de 2021, de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/20242/1/T-UCE-0012-FIG-012-P.pdf>

- Toledo, J. (12 de 04 de 2020). Evaluación funcional - estructural del pavimento del anillo de circunvalación vial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, mediante métodos convencionales y tecnología de alto rendimiento ensayo Falling Weight Deflectometer (FWD). En U. d. Ecuador, *Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil* (pág. 188). Carrera de Ingeniería Civil.
- Vásquez Varela, L. (02 de 2002). PCI para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. *ingepav, ingeniería de pavimentos*. Manizales, Caldas, Colombia: ingepav. Recuperado el 18 de 03 de 2021, de <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manual-pci1.pdf>
- Villacreses Salas, F. (28 de 05 de 2014). Diseño de Base Granular Estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos. *Proyecto de Investigación presentad en Opción para obtener el título de Ingeniero Civil*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: FAcultad de Ingeniería Civil de la Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil. Recuperado el 30 de 03 de 2021, de <http://repositorio.ulvr.edu.ec/bitstream/44000/1520/1/T-ULVR-1428.pdf>
- Viloria Villegas, M., Cadavid, L., & Awad, G. (15 de 5 de 2018). "Metodología para evaluación de impacto ambiental de proyectos de infraestructura en Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 28(2), 121-156. doi:<https://doi.org/10.18359/rcin.2941>
- Vozperu. (26 de 07 de 2017). Mantenimiento de la Ciudad de la Municipalidad Provincial del Callao. Lima, Lima, Perú.
- XU B., R. S. (2002). Development of relationships between FWD deflections and asphalt pavement layer condition indicators. *TRB*. New York, New York, USA: TRb.

Anexos

- A. ANEXO DE ALGUNOS PROYECTOS DE MANTETIMIENTO EJECUTADOS DESDE EL 2009 AL 2021
- B. ANEXO FOTOGRAFICO DE LA CONDICION SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO
- C. CALICATAS REALIZADAS SOBRE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO EXISTENTE
- D. MODELACIONES EN IMT DE LAS ALTERNATIVAS DE INTERVENCIÓN
 - 1. Modelación de la sección 1 km 0+000 a km 1+100, carril derecho e izquierdo
 - 2. Modelación de la sección 4 desde el km 14+574 al km 25+005, carril derecho e izquierdo
 - 3. Modelación de la sección 2 y 3 desde el km 1+100 al km 14+574, carril derecho e izquierdo
- E. MODELACIONES EN PALATE V2.2 PARA EVALUAR LAS CARGAS AMBIENTALES EN CICLO DE VIDA (LCI) DEL PAVIMENTO.

ANEXO A

ANEXO DE ALGUNOS PROYECTOS DE MANTETIMIENTO EJECUTADOS DESDE EL 2009 AL 2021

Año	Proyecto	Entidad contratante	Descripción de intervención
2021	Rehabilitación de vías con rap estabilizado con emulsión asfáltica, relleno y reconfiguración en Coop. Trinidad de Dios, Caminos Reales y 31 de Octubre – parroquia Pascuales.	Municipalidad de Guayaquil	Reutilización de carpeta asfáltica
2020	Mantenimiento por resultados de e45: "Y" de Baeza – Reventador – Nueva Loja (Lago Agrio), con una longitud de 160.35km, ubicada en las provincias de Napo y Sucumbíos.	Ministerio de transporte y obras públicas	Colocación de un refuerzo de 5 cm de carpeta asfáltica.
2020	Rehabilitación y reconstrucción de varias calles adyacentes al mercado de la ciudad de Jama: Avenida Sixto Zambrano, calle Pacífico Centeno Oroz, calle César Acosta Vásquez, calle Marcos Cevallos Valencia, calle José Luis Quilchana, calle Rafael Nevárez Velásquez del cantón Jama	Consejo Provincial de Manabí	Levantamiento de todo el paquete estructural y reconstrucción de la estructura con capas cien por ciento granulares y capa asfáltica.
2019	Rehabilitación y mejoramiento de la vía Machala-La Iberia (vía La Primavera), cantón Machala, Provincia de EL Oro	Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de El Oro	Fresado de carpeta asfáltica, y colocación de carpeta asfáltica de 3" con una capa de base clase I
2019	Mejoramiento y rehabilitación de varias vías de la Provincia de El Oro	Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de El Oro	Colocación de mejoramiento, base clase II, y capa de micropavimento tipo iii+ polímero 3%
2019	Mantenimiento por resultados de la carretera E15: «Y» de Calderón – «Y» de Borbón – «Y» de Las Peñas – Palestina – Redondel del Aeropuerto – Paso Lateral de Tachina – San Mateo (Empate E20), con una longitud de 141,70 km, ubicada en la Provincia de Esmeraldas.	Ministerio de Transporte y Obras Públicas	Fresado de la capa superficial, resaneo con bacheo y colocación de una capa de hormigón asfáltico de 5 y 10cm y finalmente una capa de micropavimento tipo III
2019	Mantenimiento por resultados de la carretera E40: Zhud - Biblián, E35 Zhud-Angas, E40 Zhud – Cochancay – El Triunfo, E58 troncal – Puerto Inca.	Ministerio de Transporte y Obras Públicas	Fresado de las capas superiores, colocación de una base estabilizada con cemento y colocación de una capa de hormigón asfáltico de 5 y 10cm con una capa de micropavimento tipo III

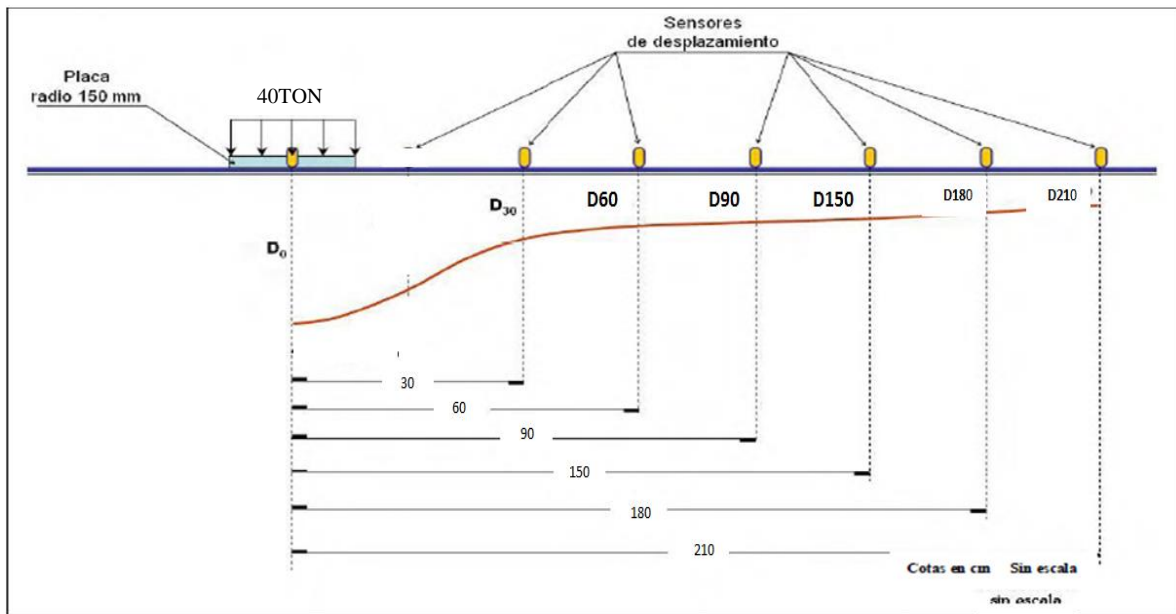
2019	Mantenimiento por resultados del tramo: Puyo-Shell Mera en su primera etapa y Tena-Puerto Napo-Capricho-Puyo-Puente Pastaza, incluye Puerto Napo – Ahuano	Ministerio de Transporte y Obras Públicas	Fresado de la capa superficial y colocación de un refuerzo de 5 y 10cm con mezcla asfáltica
Año	Proyecto	Entidad contratante	Descripción de intervención
2018	Rehabilitación de la calle principal de la Cdla. María Sol de la ciudad de Calceta, cantón Bolívar.	Gobierno Municipal del cantón Bolívar	Fresado de la carpeta asfáltica y reposición con una carpeta nueva de 2", riego de liga y resaneo de baches
2018	Rehabilitación de la vía Piedra Grande-Ventanas ubicada en la Provincia de los Ríos de 17km de longitud	Dirección Distrital 12d01-Baba-Babahoyo-Montalvo-Los Ríos-MTOP	Fresado de carpeta asfáltica y capas de base, colocación de una nueva carpeta asfáltica de 3" y base clase IV.
2018	Rehabilitación calle Ilalo desde calle 24 de Agosto hasta Lucas Ushina, y calle Santiago Sacancela desde calle Fray Jodoco Ricky hasta Lucas Ushina, barrió Lumbisi, parroquia Cumbaya	Municipio del distrito metropolitano de Quito	Readoquinado, cama de arena de 5cm, y subbase clase 3
2018	Rehabilitación y asfaltado de la vía Simón Bolívar - Pueblo Nuevo Límite Provincial, en el cantón Simón Bolívar de la Provincia del Guayas	Gobierno Provincial del Guayas	Colocación de la capa asfáltica de 2", base clase 2 y subbase clase 3
2018	Mejoramiento y Rehabilitación de la vía Jumón-Panamericana, Parroquia Jumón, cantón Santa Rosa, provincia de El Oro	Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de El Oro	Microfresado de la capa superficial, reposición de la capa superficial con una capa de micropavimento tipo iii+polímero 3%, y colocación de una estabilización de base con emulsión
2017	Rehabilitación de la carretera Chiritza-Cuyabeno-Puerto el Carmen de Putumayo	Dirección Distrital 21d02c01-Nueva Loja-Sucumbios-MTOP	Colocación de carpeta asfáltica de 2", base clase 2 y subbase clase 4.
2017	Contratación de la Rehabilitación y Mejoramiento de la vía km 19 El Esfuerzo Palmar del Bimbe en la Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas	Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Santo Domingo de los Tsáchilas	Colocación de carpeta asfáltica de 5cm, base clase 1, subbase clase 3
2016	Rehabilitación a nivel de carpeta asfáltica de 3" de la vía Paute-Bulan-Matrama en una longitud de 15.0 km, ancho promedio de 7m, del cantón Paute, provincia del Azuay	Gobierno Provincial del Azuay	Colocación de carpeta asfáltica de 2", base clase II, geomalla biaxial BX100 y subbase clase IV

2015	Mantenimiento por resultados de la Troncal Amazónica (e45), carretera Tena – Puerto Napo – Capricho – Puyo – Puente Pastaza, que incluye el tramo Puerto Napo – Ahuano	Ministerio de transporte y obras públicas	Colocación de carpeta asfáltica de 2"
2011	Rehabilitación de calles con asfaltado, construcción de bordillos-cunetas y aceras en las calles José Rugel entre Nicolás Martínez y Efraín Ayala	Gobierno Municipal de Santa Lucía	Colocación de carpeta asfáltica de 2", base clase IV, subbase clase III
2011	Rehabilitación, señalización y mantenimiento de la vía Ancon – Anconcito de 3.5 km de longitud	Ministerio de Transporte y Obras Públicas	Fresado de la capa superficial, y reposición con una nueva carpeta asfáltica de 3", base clase I

ANEXO B

ANEXO FOTOGRAFICO DE LA CONDICION SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO

A continuación, se presenta un esquema del funcionamiento del deflectómetro de impacto modelo PRI-2100, propiedad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, el cual realizan las mediciones deflectométricas para diseñar refuerzo estructural y calcular vida remanente.



ANEXO C

CALICATAS REALIZADAS SOBRE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO EXISTENTE

A continuación, se presenta el registró fotográficamente de los daños en el pavimento flexible de la vía Macas Entrada a Sinaí, las cuales se muestran a continuación.

Fotografía 1

Fallas de fisuras longitudinales acompañadas de piel de cocodrilo y en otros casos se observa grietas por contracción térmica.



Nota: En la abscisa 0+000 se observan fallas longitudinales en ambos carriles, especialmente en los ejes por donde los vehículos concentran la huella del neumático, lo que ha conllevado a que las fisuras se propaguen en forma de bloque, lo que intuye que adicional al sobreesfuerzo de tránsito existe aumento de rigidez de la carpeta debido a los cambios de temperatura de la zona de estudio.

Fotografía 2

Fallas superficiales en la abscisa 1+000 caracterizadas por piel de cocodrilo



Nota: Luego de que la superficie pierde su condición de saturación se observa claramente las líneas que se intersecan para formar la piel de cocodrilo

Fotografía 3

Falla de la abscisa 2+000 en la que se encuentra grietas por contracción térmica



Nota: Se observa claramente la línea que se traza a lo largo del carril, la cual con el transcurrir del tiempo va extendiéndose.

Fotografía 4

Falla de depresiones o hundimientos longitudinales



Nota: Es notorio encontrar baches y huecos que se han desarrollado a partir de fisuras longitudinales y transversales.

<p>Fotografía 5</p> <p>Falla de fisuras longitudinales acompañadas de abultamientos.</p>	<p>Fotografía 6</p> <p>Falla de baches y huecos sobre la calzada</p>
 <p>Nota: Se observa claramente los abultamientos sobre la calzada en la abscisa 3+000</p>	 <p><i>Nota: En la abscisa 3+200 es notorio encontrar baches y huecos que se han desarrollado a partir de fisuras longitudinales y transversales.</i></p>

<p>Fotografía 7</p> <p>Falla de fisuras de la abscisa 4+000 en la que se observan fisuras por piel de cocodrilo</p> 	<p>Fotografía 8</p> <p>Falla de media luna sobre la calzada</p> 
---	--

<p>Fotografía 9</p>

Fallas de la Abscisa 5+000 que se caracterizan por grietas por contracción térmica

Nota: Las fallas longitudinales se hacen notoria por la zona humedad que se observa en la fotografía 18 y es un agrietamiento paralelo al eje del camino, las cuales pueden ser por distintas causas, deficiencia en las juntas de construcción, asentamiento de capas por tránsito, espesor insuficiente, contracción de materiales, asentamientos aislados en capas interiores y así como una baja rigidez de la capa asfáltica superior, por motivo de las altas temperaturas superficiales (Ballesteros Santos y Benavides Ladino, 2021).

Fotografía 10

Fallas superficiales de la Abscisa 6+000 de fisuras en bloque acompañadas de piel de cocodrilo y hundimientos longitudinales



Nota: Como se observa en la fotografía el hundimiento es a lo largo de la huella vehicular, en donde se ha formado grietas longitudinales y transversales que se unen entre si y figuran una especie de rombos.

Fotografía 11

Falla de grietas por contracción térmica en la abscisa 7+000



Nota: Estas fisuras tienen espesores menores a 6mm y son erráticas, es decir se presentan

Fotografía 12

Fallas piel de cocodrilo en la abscisa 7+000



sin seguir ningún patrón de continuidad o cambio, por lo que se entendería que son de contracción térmica.

Nota: Se observa fisuras que tienen una continuidad sobre la huella vehicular, las cuales se intersecan entre sí.

Fotografía 13

Fallas superficiales de grietas de contracción térmica en la abscisa 8+000



Nota: Estas fisuras se las encontró en la abscisa 8+000 las cuales tienen espesores menores a 6mm y son erráticas, es decir se presentan sin seguir ningún patrón de continuidad o cambio.

Fotografía 14

Fallas descascaramiento del material en la abscisa 9+000



Nota: En la Abscisa 8+000, se observa fisuras que tienen una continuidad sobre la huella vehicular, las cuales se intersecan entre sí.

Fotografía 15

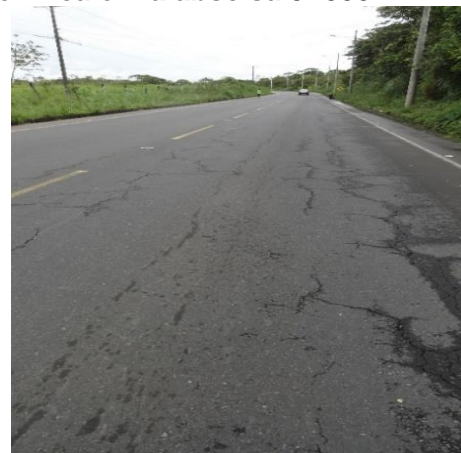
Falla de piel de cocodrilo en la abscisa 9+000



Nota: En la Abscisa 9+000, se observa fisuras que tienen una continuidad sobre la huella vehicular, las cuales se intersecan entre sí.

Fotografía 16

Fallas de grietas por contracción térmica en la abscisa 9+000



Nota: Estas fisuras se las encontró en la abscisa 9+000 las cuales tienen

	espesores menores a 6mm, las cuales se interconectan en forma de bloque.
--	--

Fotografía 17

Piel de Cocodrilo en la abscisa 10+000



Nota: En esta fotografía se observa como la grieta longitudinal a lo largo de la vía es el patron de donde se incia la formación de rombos a su alrededor. Esta falla es característica del borde de la llanta vehicular debido al sobre peso o sobreesfuerza de la carpeta asfáltica.

Fotografía 18

Falla piel de cocodrilo acompañado de grietas por contracción térmica en la abscisa 10+000



Nota: En el carril izquierdo ya se observa la formación de la piel de cocodrillo en la huella que deja el tránsito cerca del eje interno de la calzada.

Fotografía 19

Falla superficial del pavimento en la abscisa 11+000, caracterizada por piel de cocodrilo

Fotografía 20

Falla superficial del pavimento en la abscisa 11+000, caracterizada por depresiones o hundimientos longitudinales



Nota: Aquí se observa la formación de la piel de cocodrillo a un nivel de deterioro elevado debido a que se está formando círculos por los que la humedad se estanca.



Nota: Es notorio el asentamiento y hundimiento longitudinal en la calzada, en el que se ha formado un desnivel.

Fotografía 21

Piel de Cocodrillo en la abscisa 12+000



Nota: En esta fotografía se observa como la grieta longitudinal a lo largo de la vía es el patron de donde se incia la formación de rombos a su alrededor. Esta falla es característica del borde de la llanta vehicular debido al sobre peso o sobreesfuerza de la carpeta asfáltica.

Fotografía 22

Falla piel de cocodrillo acompañado de grietas por contracción térmica en la abscisa 12+000



Nota: En el carril izquierdo ya se observa la formación de la piel de cocodrillo en la huella que deja el tránsito cerca del eje interno de la calzada.

Fotografía 23

Fallas superficiales en la abscisa 13+000 en toda la calzada, caracterizadas por piel de Cocodrilo y grietas por contracción térmica.



Nota: En esta fotografía se observa como la grieta longitudinal a lo largo de la vía es el patron de donde se inicia la formación de rombos a su alrededor. Esta falla es característica del borde de la llanta vehicular debido al sobre peso o sobreesfuerza de la carpeta asfáltica, además se observa fisuras como ramificaciones que se extienden desde la fisura longitudinal hacia el borde del eje lo que indica que son grietas por contracción térmica.

Fotografía 24

Fallas superficiales en la abscisa 14+000 en toda la calzada, caracterizadas por piel de Cocodrilo y grietas por contracción térmica.



Nota: En esta fotografía se observa la formación de rombos a su alrededor, reflejada en la huella vehicular, así también se observan grietas por contracción térmica, las cuales presentan sobre un línea principal ramificaciones erráticas.

Fotografía 25

Falla superficial en la abscisa 15+000, carril derecho, de piel de Cocodrilo



Nota: Aquí se ve claramente la falla por piel de cocodrillo la cual poco a poco va uniéndose en ambas roderas de la calzada.

Fotografía 26

Falla superficial en la abscisa 15+000, carril izquierdo, Piel de cocodrilo acompañado de fallas por grietas longitudinales por fatiga.



Nota: En el carril izquierdo, las grietas transversales y longitudinales ya se ha unido formado un bloque de fisuras, producto del sobreesfuerzo que está sufriendo la carpeta asfáltica y la variación de temperatura que acelera el envejecimiento de la superficie.

Fotografía 27

Fallas superficiales en la abscisa 16+000, ambos carriles, de grietas por contracción térmica.



Fotografía 28

Falla superficial en la abscisa 16+000, carril izquierdo, Piel de cocodrilo



Nota: En el carril izquierdo, se observa que las fallas de piel de cocodrillo se hacen notorias por la líneas de humedad que se reflejan, las cuales van formando círculos con

Nota: Aquí se ve claramente la línea errática que sigue la grieta por contracción térmica, la cual se entre corta y se va uniendo hacían el otro carril.

aberturas bastante grandes y que llegan a un nivel de gravedad alto debido a que se ha formado un bache.

Fotografía 29

Fallas superficiales en la abscisa 17+000, carril derecho, en las que se encuentra grietas por contracción térmica y ahuellamiento.



Nota: Aquí se ve claramente la línea errática que sigue la grieta por contracción térmica, la cual se entre corta y se va uniendo hacían el otro carril.

Fotografía 30

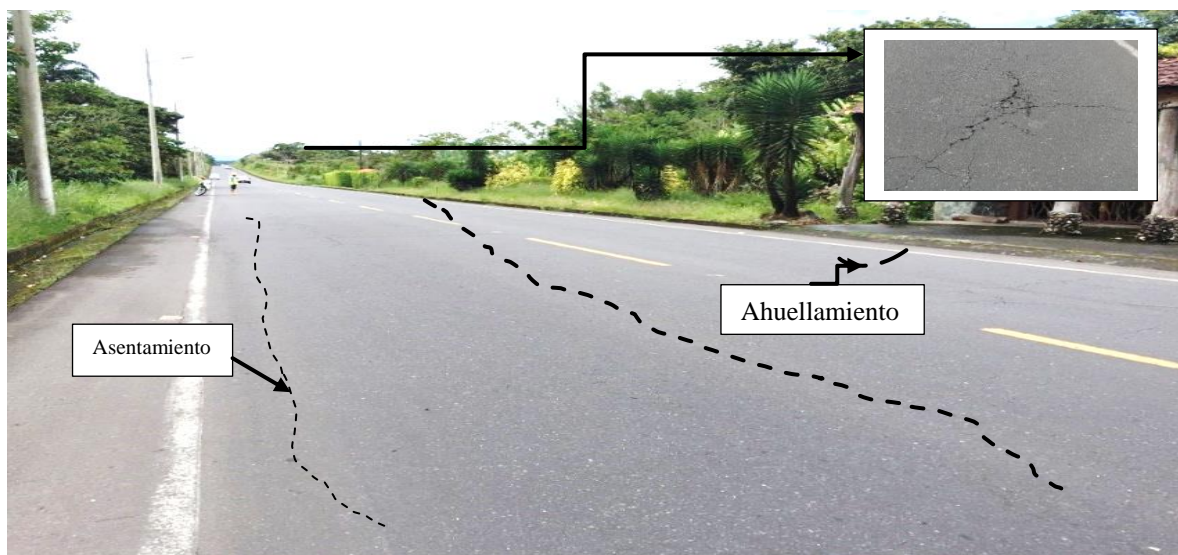
Falla superficial en la abscisa 17+000, carril izquierdo, Piel de cocodrilo



Nota: Se hace notorias las líneas que se reflejan, las cuales van formando círculos con aberturas bastante grandes y que llegan a un nivel de gravedad alto debido a que se ha formado un bache.

Fotografía 31

Fallas superficiales en la abscisa 18+000, por pérdida de agregado y ahuellamiento.



Nota: Es evidente la deformación o asentamiento permanente en la carpeta asfáltica en sentido longitudinal justo debajo de las huellas de los vehículos. Y en el mismo sector se encontró fallas de piel de cocodrillo, las cuales a medida que transcurre el tiempo se vuelven críticas hasta transformarse en baches.

Fotografía 32

Fallas superficiales en la abscisa 19+000, carril derecho, en las que se encuentra grietas por contracción térmica.



Nota: Aquí se ve claramente la línea errática que sigue la grieta por contracción térmica, desde la cual se desprenden líneas que se reflejan en fisuras.

Fotografía 33

Falla superficial en la abscisa 19+000, carril izquierdo, Piel de cocodrilo



Nota: Las líneas que se reflejan van formando círculos como se hace notorio por la humedad que lleva cada fisura.

Fotografía 34

Fallas en la abscisa 20+000, carril derecho distinguidas por piel de cocodrilo acompañado de grieta longitudinal.



Nota: Aquí se observa como las grietas longitudinales y transversales se van uniendo y entre sus espacios la abertura de las fisuras va

Fotografía 35

Falla superficial en la abscisa 20+000, carril izquierdo, ahuellamiento y grietas longitudinales por fatiga.



Nota: Se observa una línea muy marcada longitudinalmente a lo largo de todo el carril,

extendiéndose y profundizándose, esta falla se ubica en las huellas de los vehículos.

la cual se caracteriza por tener una abertura de más de 4 mm.

Fotografía 36

Fallas en la abscisa 21+000, carril derecho distinguidas por piel de cocodrilo acompañado de grieta longitudinal.



Nota: Aquí se observa como las grietas longitudinales y transversales se van uniendo y entre sus espacios la abertura de las fisuras va extendiéndose y profundizándose, esta falla se ubica en las huellas de los vehículos.

Fotografía 37

Fallas en la abscisa 21+000, carril izquierdo distinguidas por piel de cocodrilo acompañado de ahuellamiento.



Nota: En el carril izquierdo observamos claramente que sobre la falla de piel de cocodrilo existe ahuellamiento o las llamadas roderas.

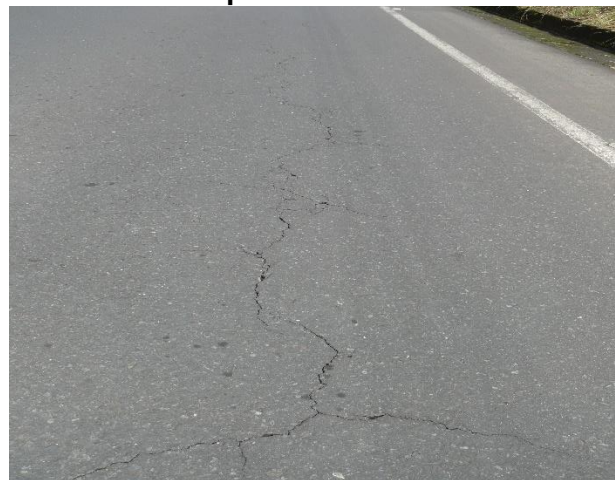
Fotografía 38

Fallas en la abscisa 22+000 a la 23+000, carril derecho distinguidas por piel de cocodrilo acompañado de grieta longitudinal.





Fotografía 39

Fallas en la abscisa 22+000 a la 23+000, carril izquierdo distinguidas por piel de cocodrilo acompañado de ahuellamiento.



Nota: En el carril izquierdo observamos claramente que sobre la falla de piel de

<p>Nota: Aquí se observa como las grietas longitudinales y transversales se van uniendo y entre sus espacios la abertura de las fisuras va extendiéndose y profundizándose, esta falla se ubica en las huellas de los vehículos.</p>	<p><i>cocodrilo existe ahuellamiento o las llamadas roderas.</i></p>
---	--

<p>Fotografía 40</p> <p><i>Fallas en la abscisa 24+000 a 25+000, carril derecho distinguidas por piel de cocodrilo acompañado de grieta longitudinal por fatiga.</i></p>  <p><i>Nota:</i> Aquí se observa como las grietas longitudinales y transversales se van uniendo y entre sus espacios la abertura de las fisuras va extendiéndose y profundizándose, esta falla se ubica en las huellas de los vehículos.</p>	<p>Fotografía 41</p> <p>Fallas en la abscisa 24+000 a 25+000, carril izquierdo distinguidas por piel de cocodrilo acompañado de grietas longitudinales por fatiga.</p>  <p><i>Nota:</i> En el carril izquierdo observamos una fisura longitudinal a la vía la cual da la pauta de que se formarán rombos a su alrededor.</p>
--	---

A. CALICATAS REALIZADAS SOBRE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO EXISTENTE

A continuación, se mostrará los sondeos realizados, y los resultados de los ensayos de laboratorio de clasificación y de resistencia de cada una de las capas encontradas.

Tabla 26

Resultados de muestreo en la calicata 1

Calicata N° 1 Proyecto: Macas - Entrada Sinal Ubicación: Absc:0+035 Tec. de Campo: E. Alvarado														
Prof (cm)	ENSAYOS REALIZADOS	Perfil Estratigráfico	DESCRIPCIÓN	Gradación % que pasa tamiz				LL	LP	I.P	Humedad Natural (%)	Desgaste a la abrasión (%)	Compactación (kg/m³)	CBR (%)
				Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200							
6	Porcentaje de asfalto Granulometría		Carpeta asfáltica % Asfalto= 5.76	72	34	14	6	NP	NP	NP				
5			Base asfáltica											
25	Granulometría Compactación CBR Desgaste		Subbase geomalla	47,4	41,8	27,3	6,9	NP	NP	NP		38,1	1950	58
40			Meioramiento: es un pedraplen											
75	Granulometría Compactación CBR		Subrasante	100	66	56,2	52	63,7	27,2	12	59,55		1320	4,5

Fotografía 42

Sondeo para extracción de muestras y toma de espesores



Nota: Sondeo efectuado en la abscisa 0+035

Fotografía 43

Registro de espesores de la estructura.



Tabla 27

Resultados de muestreo en la calicata 2

Calicata N° 2														
Proyecto: Macas - Entrada Sinai														
Ubicación: Absc:5+550														
Tec. de Campo: E. Alvarado														
Espesor (cm)	ENSAYOS REALIZADOS	Perfil Estratigráfico	DESCRIPCIÓN	Gradación % que pasa tamiz				LL	LP	I.P.	Humedad Natural (%)	Desgaste a la abrasión (%)	Compactación (kg/m³)	CBR (%)
				Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200							
7	Densidad BULK Porcentaje de asfalto Granulometría		Carpeta asfáltica % Asfalto 5,19	70	39	25	5	NP	NP	NP				
6			Base asfáltica											
25	Granulometría Compactación CBR Desgaste		Subbase geomalla	9,4	39,9	21,6	4,1	NP	NP	NP		35,68	2013	62
40			Mejoramiento: es un pedraplen											
76	Granulometría Compactación CBR		Subrasante	100	75	89	83,2	66,6	24,6	42	35,85		1480	5,6

Fotografía 44 y Fotografía 45

Realización de extracción de núcleo en la abscisa 5+550



Fotografía 46

Registro de espesores de la estructura en la abscisa 5+550





Tabla 28

Resultados de muestreo en la calicata 3

Calicata N° 3 Proyecto: Macas - Entrada Sinai Ubicación: Absc:15+000 Tec. de Campo: E. Alvarado														
Prof (cm)	ENSAYOS REALIZADOS	Perfil Estratigráfico	DESCRIPCIÓN	Gradación % que pasa tamiz				LL	LP	I.P	Humedad Natural (%)	Desgaste a la abrasión (%)	Compactación (kg/m³)	CBR (%)
				Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200							
6	Porcentaje de asfalto Granulometría		Carpeta asfáltica % Asfalto= 5,91	73	35	18	6	NP	NP	NP				
5			Base asfáltica											
25	Granulometría Compactación CBR Desgaste		Subbase geomalla	8	35	25	8	NP	NP	NP	36	1996	61,0	
40			Mejoramiento: es un pedraplen											
75	Granulometría Compactación CBR		Subrasante	100	85	78	52	63,7	27	12	45,2	1518	5,6	

Fotografía 47

Realización de extracción de núcleo en la abscisa 21+200



Fotografía 48

Excavación y visualización de los espesores de la estructura en la abscisa 15+000



Tabla 29

Resultados de muestreo en la calicata 4

Calicata N° 4 Proyecto: Macas - Entrada Sinai Ubicación: Absc:21+200 Tec. de Campo: E. Alvarado														
Espesor (cm)	ENSAYOS REALIZADOS	Perfil Estratigráfico	DESCRIPCIÓN	Gradación % que pasa tamiz				LL	LP	I.P	Humedad Natural (%)	Desgaste a la abrasión (%)	Compactación (kg/m³)	CBR (%)
				Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200							
7	Densidad BULK Porcentaje de asfalto Granulometría		Carpeta asfáltica % Asfalto 6,5	66	34	14	4	NP	NP	NP				
7			Base asfáltica											
18	Granulometría Compactación CBR Desgaste		Subbase geomalla	9,2	41,6	20,5	5,8	NP	NP	NP	33,48	1993	63	
33			Mejoramiento: es un pedraplen											
65	Granulometría Compactación CBR		Subrasante	100	93,8	85,2	58,6	55,06	29,47	25,6	40,34		1502	5,2

Fotografía 49

Realización de extracción de núcleo en la abscisa 21+200



Fotografía 50

Registro de espesores de la estructura en la abscisa 21+200



Tabla 30

Resultados de muestreo en la calicata 5

Calicata N° 5														
Proyecto: Macas - Puyo														
Ubicación: Absc:24+550														
Tec. de Campo: E. Alvarado														
Espesor (cm)	ENSAYOS REALIZADOS	Perfil Estratigráfico	DESCRIPCIÓN	Gradación % que pasa tamiz				LL	LP	I.P	Humedad Natural (%)	Desgaste a la abrasión (%)	Compactación (kg/m³)	CBR (%)
				Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200							
7	Densidad BULK Porcentaje de asfalto Granulometría		Carpeta asfáltica % Asfalto 5,19	81	42	25	4	NP	NP	NP				
6			Base asfáltica											
12	Granulometría Compactación CBR Desgaste		Subbase geomalla	7,8	42	22,1	8,8	NP	NP	NP	37,9	2004	57,0	
60			Mejoramiento: es un pedraplen											
80	Granulometría Compactación CBR		Subrasante	100	97	89,70	83,2	66,55	41,97	20	35,85	1602	7,2	

Calicata Abscisa 24+550

Fotografía 51

Toma de muestra de la capa de carpeta y registro de espesores de carpeta en la abscisa 24+550



Fotografía 52

Registro de espesores de la estructura en la abscisa 24+550



ANEXO D

MODELACIONES EN IMT DE LAS ALTERNATIVAS DE INTERVENCIÓN.

Esta sección presenta las modelaciones de la estructura de pavimento de cada tramo usando el software de IMT-PAVE-ECUADOR, herramienta desarrollada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador en coordinación con el Instituto Mexicano del Asfalto de México.

2.1 Modelación de la sección 1 km 0+000 a km 1+100, carril derecho e izquierdo

La modelación con las propiedades de los materiales se tomará en cuenta los siguientes módulos resilientes de capa.

El módulo de la capa semi infinita es tomado del material ensayado en laboratorio el cual se clasifica como A-7-6 según AASHTO y según SUCS CH, donde su valor típico es 55 MPa

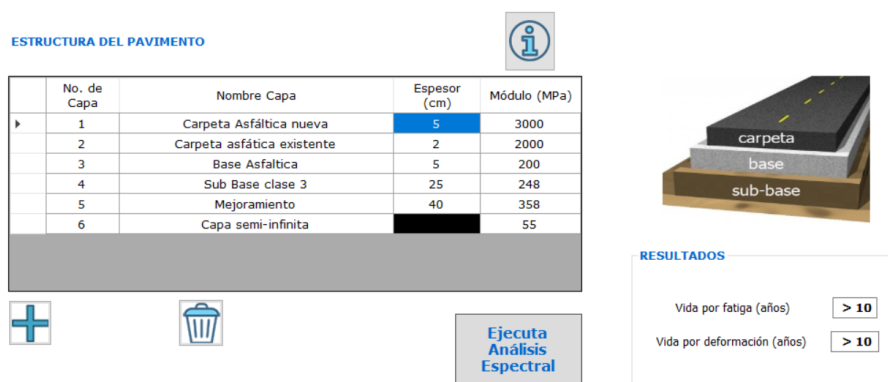
El módulo de mejoramiento ha sido tomado del valor determinado por deflectometría=363kg/cm²≈358 MPa

El módulo de la subbase de acuerdo a los resultados ensayados indica que es un GM, A-1-a, que su valor típico es 248MPa.

Alternativa 1. Fresado y reposición de carpeta con umbral de diseño de 10 años

Figura 54

Estructura de pavimento con Alternativa 1. Análisis Determinista



Nota: Modelación de la estructura de pavimento planteada para la alternativa 1 en el IMT- PAVE-ECUADOR

Figura 55

Estructura de pavimento con Alternativa 1. Análisis Probabilístico

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)	Coefficiente de Variación, %
1	Carpeta Asfáltica nueva	5	3000	15
2	Carpeta asfáltica existente	2	2000	15
3	Base Asfáltica	5	200	15
4	Sub Base clase 3	25	248	15
5	Mejoramiento	40	358	15
6	Capa semi-infinita		55	15

CONFIABILIDAD: 70%

RESULTADOS:
 Vida por fatiga (años) > 10
 Vida por deformación (años) > 10

Análisis Probabilista
Reporte

Nota: Modelación de la estructura de pavimento planteada para la alternativa 1 en el IMT- PAVE- ECUADOR

Alternativa 1.1. Fresado y reposición de carpeta con umbral de diseño de 20 años

Complementando el analisis sobre la misma alternativa 1. se definió hipotéticamente que el periodo de vida útil sea de 20 años, cuyos resultados indican lo siguiente:

Figura 56

Estructura de pavimento con Alternativa 1.1. Análisis Determinístico

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

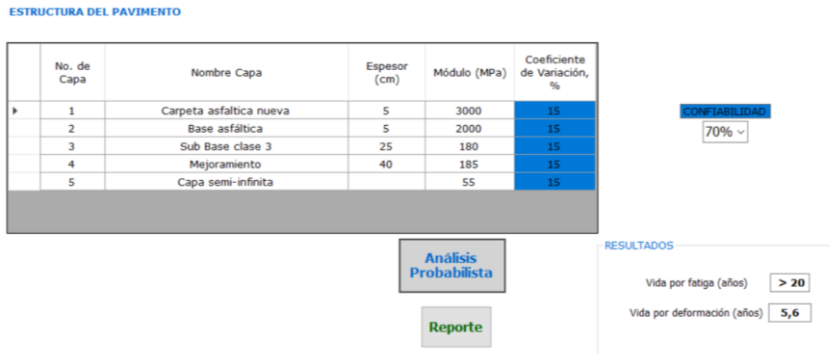
No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	Carpeta asfáltica nueva	5	3000
2	Base asfáltica	5	2000
3	Sub Base clase 3	25	180
4	Mejoramiento	40	185
5	Capa semi-infinita		55

Ejecuta Análisis Espectral

RESULTADOS:
 Vida por fatiga (años) > 20
 Vida por deformación (años) 6,6

Figura 57

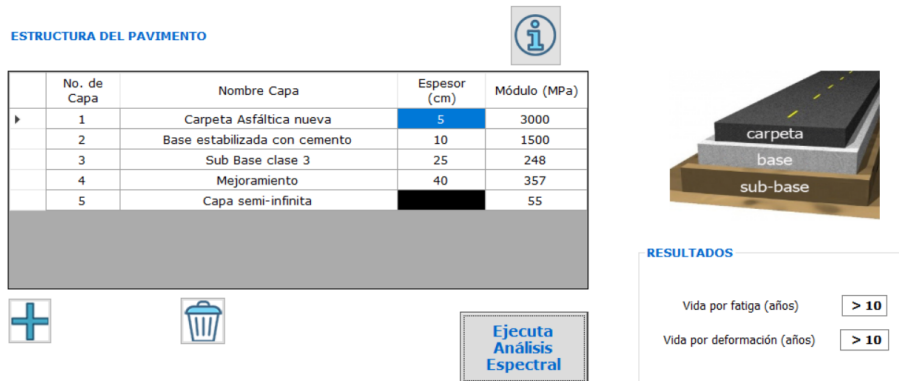
Estructura de pavimento con Alternativa 1.1. Análisis Probabilístico



Alternativa 2. Fresado y Recuperación de materiales mezclados con aglutinante(cemento)

Figura 58

Estructura de pavimento con Alternativa 2. Análisis Determinístico para 10 años



Nota: Modelación Determinística en IMT- PAVE-ECUADOR con módulos resilientes de ensayos efectuados.

Figura 59

Estructura de pavimento con Alternativa 2. Análisis Probabilístico para 10 años

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)	Coefficiente de Variación, %
1	Carpeta Asfáltica nueva	5	3000	15
2	Base estabilizada con cemento	10	1500	15
3	Sub Base clase 3	25	248	15
4	Mejoramiento	40	357	15
5	Capa semi-infinita		55	15

CONFIABILIDAD
70%

Análisis Probabilista
Reporte

RESULTADOS
Vida por fatiga (años) > 10
Vida por deformación (años) > 10

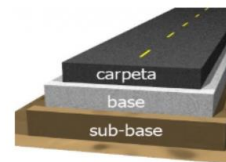
Nota: Modelación probabilística en IMT- PAVE-ECUADOR con módulos resilientes de ensayos efectuados.

De la misma manera se verificó el mismo análisis anterior con un periodo de vida útil de 20 años y se encontró lo siguiente:

Figura 60

Estructura de pavimento con Alternativa 2. Análisis Determinístico para 20 años

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	Carpeta Asfáltica	5	3000
2	Base estabilizada con cemento	10	1500
3	SubBase Granular clase 3	18	248
4	Mejoramiento	60	357
5	Capa semi-infinita		55



RESULTADOS
Vida por fatiga (años) > 20
Vida por deformación (años) > 20

Nota: Modelación probabilística en IMT- PAVE-ECUADOR con módulos resilientes de ensayos efectuados.

2.2 Modelación de la sección 4 desde el km 14+574 al km 25+005, carril derecho e izquierdo

Alternativa 1. Fresado y Reposición de carpeta asfáltica

Figura 61

Estructura de pavimento con Alternativa 1, sección 4 km 14+574 a km 25+005, carril derecho e izquierdo por medio de un análisis determinístico para 20 años.

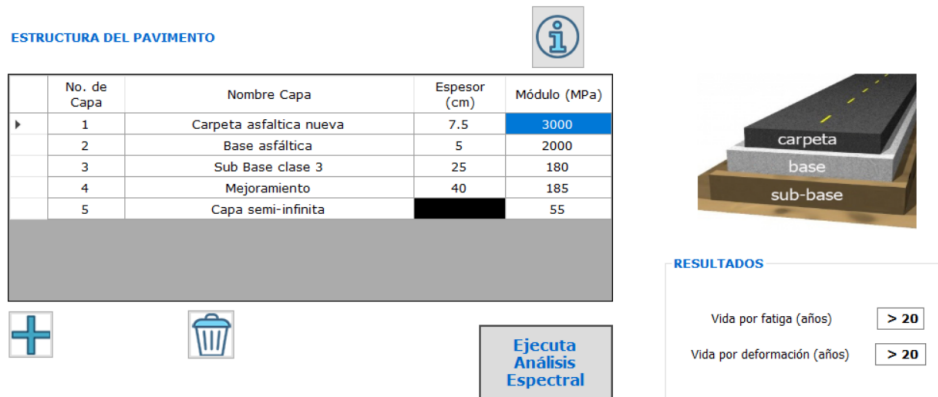
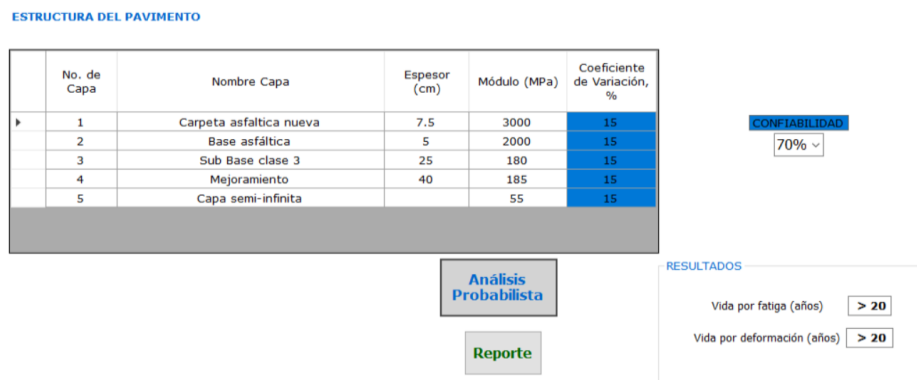


Figura 62

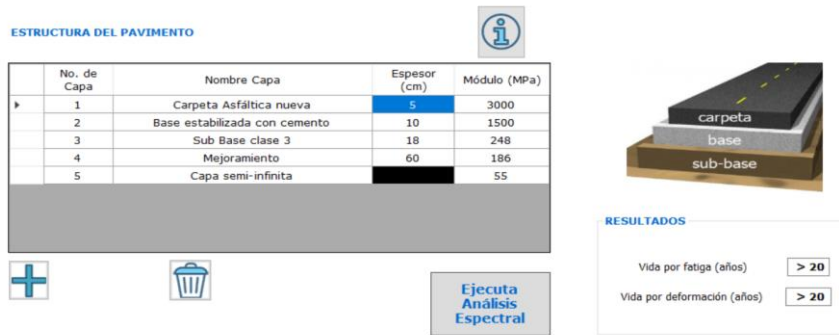
Estructura de pavimento con Alternativa 1, sección 4- km 14+574 a km 25+005, carril derecho e izquierdo por medio de un análisis probabilístico para 20 años



Alternativa 2. Fresado y Recuperación de materiales mezclados con aglutinante(cemento)

Figura 63

Estructura de pavimento con alternativa 2, sección 4- km 14+574 a km 25+005, carril derecho e izquierdo por medio de un análisis determinístico.



2.3 Modelación de la sección 2 y 3 desde el km 1+100 al km 14+574, carril derecho e izquierdo

Alternativa 1. Fresado y reposición de carpeta

Figura 64

Modelación de la estructura de pavimento con alternativa 1, sección 2 y 3 desde el km 1+100 al km 14+574, carril derecho e izquierdo.

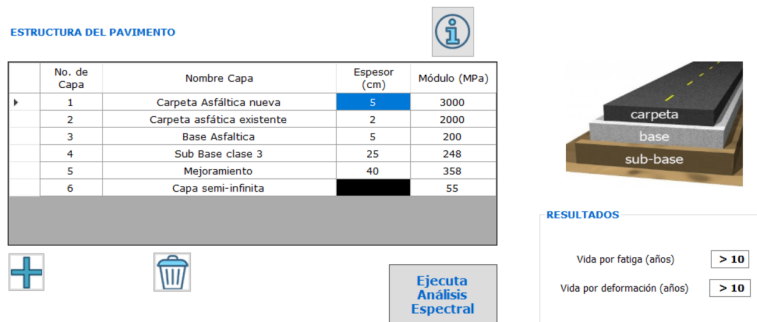


Figura 65

Modelación de la estructura de pavimento con alternativa 1, sección 2 y 3 desde el km 1+100 al km 14+574, carril derecho e izquierdo.

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)	Coefficiente de Variación, %
1	Carpeta Asfáltica nueva	5	3000	15
2	Carpeta asfáltica existente	2	2000	15
3	Base Asfáltica	5	200	15
4	Sub Base clase 3	25	248	15
5	Mejoramiento	40	358	15
6	Capa semi-infinita		55	15

CONFIABILIDAD
70% ▾

RESULTADOS
Vida por fatiga (años) > 10
Vida por deformación (años) > 10

Análisis Probabilista

Reporte

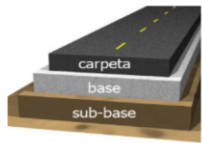
Alternativa 2. Fresado y Recuperación de materiales mezclados con aglutinante(cemento)

Figura 66

Modelación de la estructura de pavimento con alternativa 2, sección 2 y 3 desde el km 1+100 al km 14+574, carril derecho e izquierdo.

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	Carpeta asfáltica nueva	5	3000
2	Base estabilizada con cemento	10	1500
3	Sub base clase 3	25	248
4	Mejoramiento	40	186
5	Capa semi-infinita		55



RESULTADOS
Vida por fatiga (años) > 20
Vida por deformación (años) > 20

Ejecuta Análisis Espectral

Figura 67

Modelación de la estructura de pavimento con alternativa 2, sección 2 y 3 desde el km 1+100 al km 14+574, carril derecho e izquierdo.

ANEXO E

MODELACIONES EN PALATE V2.2 PARA EVALUAR LAS CARGAS AMBIENTALES EN CICLO DE VIDA (LCI) DEL PAVIMENTO.

El análisis con el software paLATE V2.2 se enfocó en la evaluación de las dos alternativas planteadas en el numeral 3.3.3 de mantenimiento y rehabilitación.

Los resultados encontrados del análisis de la alternativa 1: fresado y reposición de carpeta, se muestran a continuación:

		Energy [GJ]	CO2e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	1.877,7	834.281
	Materials Transportation	426,6	29.428
	Equipment	31,8	2.191
Maintenance	Materials Production	2.433,9	696.733
	Materials Transportation	13.979,4	964.416
	Equipment	43,1	2.972
Total	Materials Production	4.311,6	1.531.014
	Materials Transportation	14.405,9	993.844
	Equipment	74,8	5.163
Total		18.792,4	2.530.021

Figura 68

Consumo total de energía de la Alternativa 1, por procesamiento, transporte y producción de los materiales.

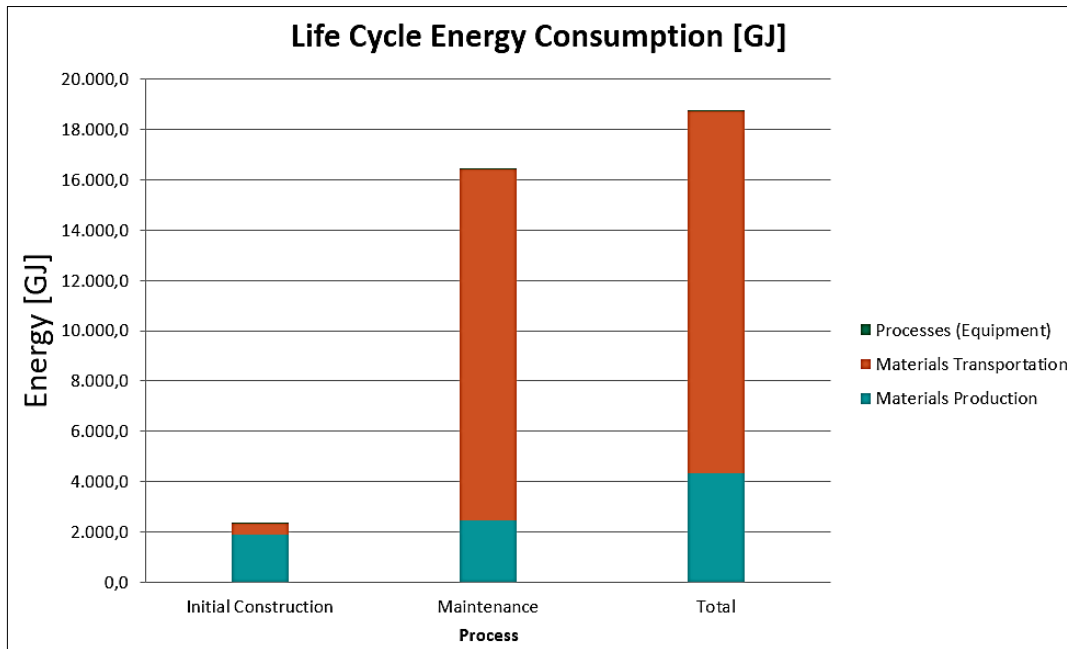
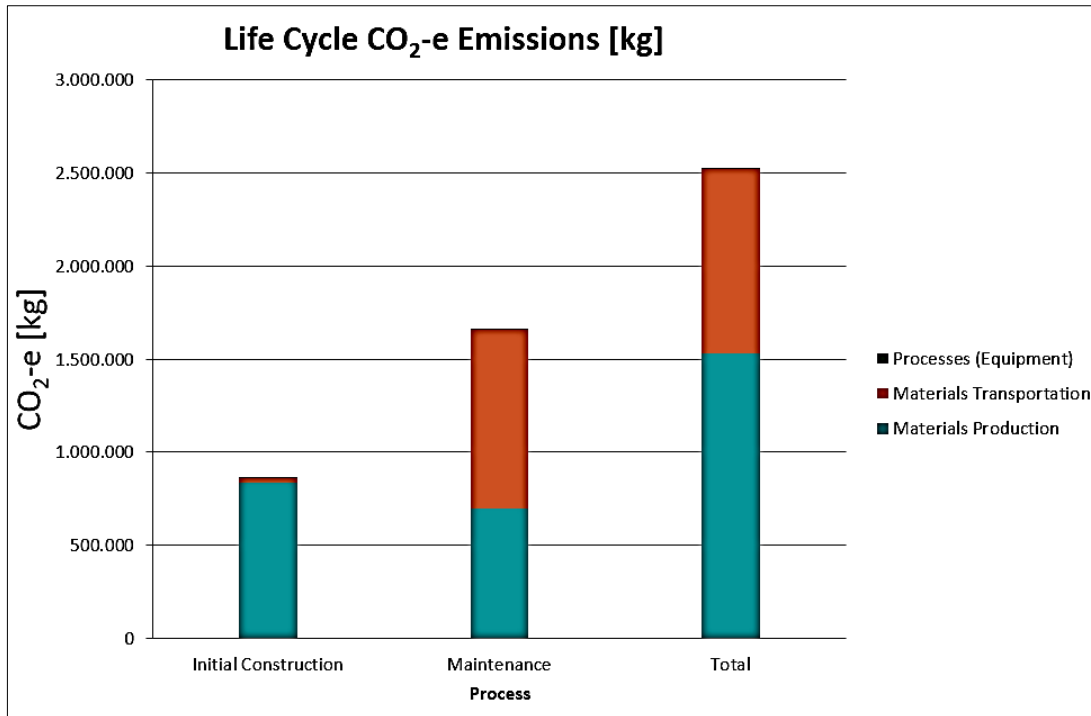


Figura 69

Emisiones totales de carbono de la Alternativa 1, por procesamiento, transporte y producción de los materiales.



A continuación, se muestra el análisis de la alternativa 2: fresado y recuperación de materiales mezclados con aglutinante(cemento), que refiere a la cuantificación de materiales por construcción y mantenimiento.

		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	4.223,3	895.858
	Materials Transportation	247,4	17.067
	Equipment	10,3	708
Maintenance	Materials Production	1.523,3	217.287
	Materials Transportation	41,1	2.833
	Equipment	10,2	706
Total	Materials Production	5.746,6	1.113.145
	Materials Transportation	288,5	19.900
	Equipment	20,5	1.414
Total		6.055,5	1.134.459

Figura 70

Consumo total de energía de la Alternativa 2, por procesamiento, transporte y producción de los materiales.

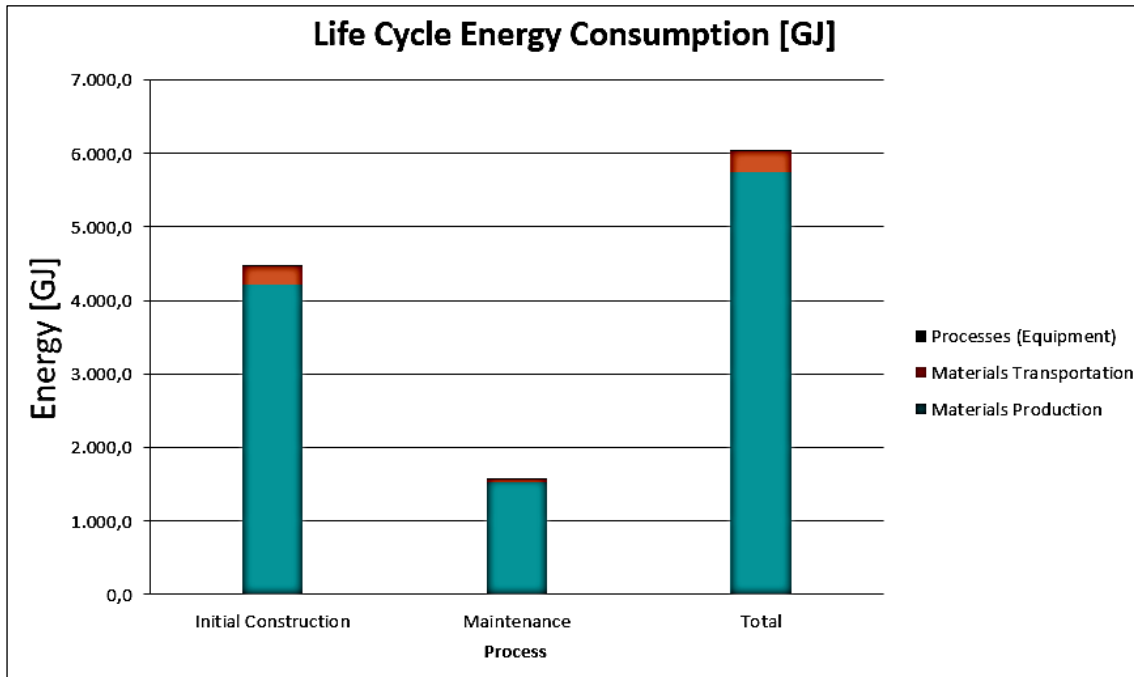


Figura 71

Emisiones totales de carbono de la Alternativa 2, por procesamiento, transporte y producción de los materiales.

