



**UNIVERSIDAD CENTRAL
VICERRECTORÍA ACADÉMICA**

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA DE LA INVESTIGACIÓN:

**EVALUACIÓN DE PLANES DE INTERVENCIÓN PARA EL
MEJORAMIENTO DE LAS VÍAS DE ACCESO A LA
COMUNIDAD DE LA FLORIDA DE TIBÁS, MEDIANTE EL
USO DE LA METODOLOGÍA PCI Y LA METODOLOGÍA DE
TOMA DE DECISIONES MULTIVARIABLES**

**MODALIDAD DE TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA CIVIL**

NOMBRE DEL ESTUDIANTE

JASON MURILLO LÓPEZ

NOMBRE DEL TUTOR DE LA INVESTIGACIÓN

DANIELA MOYA SOLANO

SEDE CENTRAL
JULIO, 2024

Contenido

Contenido	2
Tablas	7
Figuras.....	9
Agradecimiento y dedicatoria.....	11
Resumen ejecutivo.....	13
CAPÍTULO I: PROBLEMA	15
Planteamiento del Problema	16
Objetivos.....	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos.....	17
Justificación	18
Antecedentes	18
Proyecciones	23
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	25
Definición de Pavimento	26
Tipos de pavimento	27
Pavimentos Flexibles método de la AASHTO 93	28
Pavimentos Rígidos método de la AASHTO 93	29
Generalidades de los pavimentos flexibles y rígidos	30
Análisis de costos	31
Funcionalidad y operación	31

Diseño	32
Seguridad.....	33
Deterioro del pavimento	33
Deterioros y Fallas en los pavimentos.....	37
Metodología del Paviment Condition Index (PCI)	45
Unidades de Muestreo (UM).....	46
Longitud de la unidad de muestreo.....	46
Número Total de UM (N).....	46
Número Mínimo de UM a inspeccionar (n).....	47
Escogencia de UM a inspeccionar	48
Nivel de severidad y extensión del deterioro	49
Densidad de deterioro.	50
Valor Deducido (VD).....	50
Número de Deduciones Admisibles (m)	50
Máximo VD Corregido (VDC Máx).....	51
Cálculo de PCI.....	51
Metodología de Toma de Decisiones Multivariable (TDMV).....	52
Planes de Mantenimiento Vial mediante el Modelo Integrado de Valorpara	
Evaluaciones Sostenibles (MIVES).....	54
Ubicación geográfica del Área de Estudio	59
Ruta 1.	60

Ruta 2.	61
Ruta 3.	62
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....	64
Enfoque de la investigación.....	65
Método de la Investigación.....	65
Fuentes de información	66
Población.....	66
Muestra.....	66
Instrumentos.....	67
Proceso para la recolección y análisis de datos	69
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	71
Estado del pavimento flexible mediante la Metodología del PCI.....	72
Unidad de Muestreo (UM):	72
Longitud de la UM:.....	72
Número Total de UM (N):.....	73
Número Mínimo de UM a Inspeccionar (n):.....	73
Escogencia de UM a Inspeccionar:.....	74
Tabulación de Deterioros y revisión en sitio	75
Densidad del Deterioro	77
Valor Deducido (VD).....	77
Número de Deduciones Admisibles (m)	78

Máximo VD Corregido (VDC Máx).....	78
Cálculo de PCI para la UM	80
Evaluación de PCI para la Ruta 1:.....	81
Evaluación de PCI para la Ruta 2:.....	82
Evaluación de PCI para la Ruta 3:.....	83
Planes de Mantenimiento Vial de las rutas de acceso	84
Plan de Mantenimiento para la Ruta 1:.....	86
Plan de Mantenimiento para la Ruta 2:.....	87
Plan de Mantenimiento para la Ruta 3:.....	88
Criterio ambiental y sus indicadores para las rutas de acceso	89
Emisiones de CO2 (kg/m).....	89
Consumo Energético (MJ/m)	92
Criterio social y sus indicadores para las rutas de acceso.	95
Población (Personas).....	95
Tiempo de Recorrido (min).....	95
Capacidad de Centros Educativos (Estudiantes)	97
Tránsito Promedio Diario (ESALS).....	98
Evaluación en el Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible	100
Requerimientos	101
Criterios.....	101
Indicadores	101

Funciones de Valor.....	102
Análisis de Sostenibilidad de las Rutas de Acceso	103
Análisis Económico	104
Análisis Ambiental.....	105
Análisis Social	105
Análisis General de Sostenibilidad	106
Propuesta Final de Priorización de los planes de Mantenimiento	107
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	109
Conclusiones	110
Recomendaciones.....	111
REFERENCIAS	113
Apéndices	118

Tablas

Tabla 1. Criterios diferenciales entre estos dos tipos de pavimentos.....	30
Tabla 2. Causas principales por las que se deteriora un pavimento.....	34
Tabla 3. Clasificación de categorías de deterioro de pavimentos flexibles y rígidos	37
Tabla 4. Deterioros y sus principales características, Categoría 1. Grietas.....	38
Tabla 5. Deterioros y sus principales características.Categoría 2. Deformaciones	40
Tabla 6. Deterioros y sus principales características.Categoría 3. Textura Superficial ..	42
Tabla 7. Deterioros y sus principales características, Categoría 4. Misceláneos	44
Tabla 8. Longitud de Unidad de muestra según ancho de calzada	46
Tabla 9 Criterio de selección de UM a inspeccionar	47
Tabla 10 El procedimiento por etapas de la investigación.	69
Tabla 11 Unidades de Muestreo a inspeccionar.....	75
Tabla 12 Ejemplo de Cálculo de PCI para Ruta 2.	81
Tabla 13 Cálculo de PCI para Ruta 1.....	81
Tabla 14 Cálculo de PCI para Ruta 2.....	82
Tabla 15 Cálculo de PCI para Ruta 3.....	83
Tabla 16 Determinación de costo para mantenimiento.....	85
Tabla 17 Propuesta Plan de Mantenimiento para Ruta 1	87
Tabla 18 Propuesta Plan de Mantenimiento para Ruta 2	88
Tabla 19 Propuesta Plan de Mantenimiento para Ruta 3	89
Tabla 20 Emisiones de CO2 por Tarea de Mantenimiento por Unidad de Medida a 12 años	90
Tabla 21 Emisiones de CO2 de la Ruta 1 por un plazo de 12 años	90
Tabla 22 Emisiones de CO2 de la Ruta 2 por un plazo de 12 años	91
Tabla 23 Emisiones de CO2 de la Ruta 3 por un plazo de 12 años	92

Tabla 24. Consumo energético por tarea de mantenimiento por unidad de medida a 12 años	92
Tabla 25. Consumo energético de la ruta 1 por un plazo de 12 años	93
Tabla 26. Consumo energético de la ruta 2 por un plazo de 12 años	94
Tabla 27. Consumo energético de la ruta 3 por un plazo de 12 años	94
Tabla 28. Población proyectada por ruta	95
Tabla 29. Tiempo de recorrido promedio para la ruta 1	96
Tabla 30. Tiempo de recorrido promedio para la ruta 2	96
Tabla 31. Tiempo de recorrido promedio para la ruta 3	97
Tabla 32. Capacidad de centros educativos alrededor de las rutas de acceso	98
Tabla 33. Aforo vehicular para la ruta 1	98
Tabla 34. TDP para la ruta 1	99
Tabla 35. Aforo vehicular para la Ruta2	99
Tabla 36. TDP para la ruta 2	99
Tabla 37. Aforo vehicular para la ruta 3	99
Tabla 38. TDP para la ruta 3	100
Tabla 39. Propuesta de priorización de intervención de rutas de acceso	108

Figuras

Figura 1. Estructuración de pavimento flexible	28
Figura 2. Estructuración de pavimento rígido	29
Figura 3. Comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos	32
Figura 4. Relación entre características de deterioros y estrategias de intervención.....	36
Figura 5. Escala de Evaluación de PCI	52
Figura 6. Pilares de la Sostenibilidad.....	53
Figura 7. Árbol de Decisión Genérico del MIVES.....	56
Figura 8. Expresión Matemática General de la Función de Valor	57
Figura 9. Escala de Comparación de Saaty	58
Figura 10. Mapa de Ruta de Estudio en la comunidad de La Florida de Tibás.....	60
Figura 11. Mapa de Ruta 1.	61
Figura 12. Mapa de Ruta 2.	62
Figura 13. Mapa de Ruta 3.	63
Figura 14. Hoja de Levantamiento de Deterioros.....	68
Figura 15. Selección de Longitud de UM	72
Figura 16. Selección de n bajo criterio técnico	73
Figura 17 Unidades de muestreo y su selección aleatoria.....	74
Figura 18 Hoja de Inspección de Deterioros de la UM 30 en la Ruta 2	76
Figura 19 Gráfica para el Cálculo de los Valores Deducidos del Deterioro Cuero de Lagarto en el Asfalto.	78
Figura 20 Ejemplo Cálculo VDC Máx	79
Figura 21 Ejemplo de aproximación de VDC.	79
Figura 22 Ejemplo Cálculo VDC Máx.....	80
Figura 23 Costos Estimados para Tratamientos en Pavimentos MAC.	84

Figura 24 Vida Útil de las Tareas de Mantenimiento Propuestas	86
Figura 25 Árbol de Decisión del Proyecto	100
Figura 26 Pesos del Árbol de Requerimientos de la investigación	103
Figura 27 Gráfico de Pastel para Análisis Total de las Rutas de Acceso	104
Figura 28 Gráfico de Barras para Costo de Planes de Mantenimiento	104
Figura 29 Gráfico de Barras para Análisis Ambiental de las Alternativas	105
Figura 30 Gráfico de Barras para Análisis Social de las Alternativas	106
Figura 31 Gráfico de Barras para Análisis General de Sostenibilidad.....	106

Agradecimiento y dedicatoria

En este momento tan especial, quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios por su amor incondicional, que ha sido mi guía y fortaleza en cada paso de mi camino.

Desde el día que Lo conocí, he sido afortunado al experimentar Su favor y compañía cada día de mi vida. ¡Gracias, Señor!

Agradezco con todas mis fuerzas a mis padres. Mami y Papi han sido mis pilares fundamentales, inculcándome valores y principios que me han permitido perseverar y luchar por mis sueños. Ellos son el mayor ejemplo de lucha, sacrificio, amor y lealtad que pude tener; los amo con mi alma y jamás podré pagarles lo mucho que hicieron para que pudiera cumplir esta meta. ¡Gracias, Ma y Gracias, Pa! Sueño con ser como ustedes.

Dedico este triunfo a mi esposa, mi compañera de vida, mi apoyo incondicional durante 20 años, mi inspiración para ser mejor cada día y mi roca en medio de las dificultades.

Gracias por creer en mí y por estar a mi lado en cada momento. Definitivamente no hubiera llegado hasta aquí sin ti; eres esa perla preciosa que me engalana, mi complemento perfecto, quien da equilibrio a mi vida y mi mayor razón de superación. Este título también es tuyo; aquí también están tu sudor y lágrimas. ¡Te amo con todo mi corazón, Princesita!

También dedico esto a mis “gemelos no gemelos”, mi preciosa y tierna Ally y mi campeón y fuerte Jhos, mis hijos, quienes son la razón de mi esfuerzo diario, el motor que impulsa mi voluntad y la inspiración que me impulsa a ser un ejemplo en sus vidas. Su amor y apoyo incondicional son mi mayor motivación para seguir adelante y alcanzar mis metas. Aquí voy a estar a su lado siempre, mis pequeños. ¡Los amo con locura!

Gracias a todos ustedes por ser parte de mi vida, por su amor incondicional y por su constante apoyo. Hoy celebro este logro con ustedes, sabiendo que juntos hemos superado obstáculos y alcanzado grandes metas. ¡Gracias por ser mi familia y por estar siempre a mi lado!

Con amor y gratitud

Resumen ejecutivo

El documento presenta una investigación exhaustiva sobre la evaluación comparativa de planes de intervención para mejorar las tres principales vías de acceso a la comunidad de La Florida, Tibás. El problema central es el deterioro de las vías, que afecta la movilidad y seguridad de los residentes. La investigación busca responder cómo generar un plan de intervención utilizando la metodología del Índice de Condición del Pavimento (PCI) y la metodología de Toma de Decisiones Multivariable (TDMV).

Se inicia abordando temas fundamentales relacionados con el pavimento, incluyendo su definición, tipos, deterioro y metodologías de evaluación. Luego, se describe que el método PCI determina la condición del pavimento mediante un índice numérico que fluctúa entre 0 (falla) y 100 (excelente). Su cálculo se basa en los resultados de la inspección visual de los pavimentos, mediante la cual se identifican tipos de deterioro, severidad y cantidad. A través de su aplicación, se genera una propuesta de plan de mantenimiento para cada una de las rutas de estudio, determinando intervenciones cada 4 años en un plazo total de 12 años.

Se profundiza en el concepto de PCI y se presenta la TDMV como una herramienta para la toma de decisiones en la intervención vial. La investigación es descriptiva y exploratoria, con un diseño no experimental transversal. Los resultados indican que la mayoría de los residentes perciben un deterioro significativo en las vías, identificando áreas críticas que requieren atención inmediata.

Se concluye que es imperativo implementar un programa de mantenimiento preventivo y priorizar las intervenciones en las vías más dañadas. Se recomienda involucrar a la comunidad y utilizar tecnologías de evaluación para optimizar los recursos.

Finalmente, se presenta una propuesta de intervención que incluye un plan detallado para mejorar las vías de acceso, con el objetivo de restaurar las vías y mejorar la calidad de vida de los habitantes de La Florida, optimizando la movilidad y la seguridad vial.

Palabras clave: Metodología, PCI, Multi variable, propuesta, evaluación.

CAPÍTULO I: PROBLEMA

Planteamiento del Problema

La comunidad de La Florida, ubicada en el distrito de San Juan de Tibás, es una ruta de tránsito importante entre las comunidades aledañas. Esta comunidad posee tres rutas de acceso principales, cuya calidad de pavimentos se encuentra en mal estado de conservación. La cantidad de vehículos que transita diariamente por estas vías es considerable, ya que forman parte de una red vial que interconecta Moravia, Goicoechea, Tibás y Santo Domingo de Heredia. Es factible que la calle de La Florida sea intervenida para atender el flujo vehicular en la red vial interconectada.

El estado actual de las vías refleja una deficiente respuesta del gobierno local al no asignar los recursos económicos necesarios para el mantenimiento oportuno de los pavimentos (Contreras, 2023). Esta falta de mantenimiento se traduce posteriormente en un costo significativamente mayor para reparar las vías, en comparación con el costo de un mantenimiento preventivo adecuado. Rebolledo (2010) explica a continuación el problema de la falta de mantenimiento.

El mantenimiento adecuado y oportuno de un camino requiere de la realización de un conjunto de operaciones durante la vida útil de la obra. Como una manera de ordenar y facilitar la programación de las muy diversas operaciones de mantenimiento, éstas se clasifican en tres niveles, en función de las características del trabajo y de la periodicidad con que suelen requerirse: operaciones de conservación rutinaria, operaciones de conservación periódica y restauraciones. (p. 7)

La recuperación de estas vías requiere una toma de decisiones oportuna que trascienda lo económico y lo político, para considerar criterios como los ofrecidos en el Modelo Integrado de Valor para las Evaluaciones de Sostenibilidad (MIVES). Este modelo permite ejecutar acciones sencillas y eficaces.

Dado el problema descrito, la investigación tiene como meta resolver la siguiente pregunta: ¿Cómo generar una propuesta de plan de intervención para el mejoramiento de la calle de La Florida en Tibás, utilizando las metodologías PCI y Toma de Decisiones Multivariable?

Objetivos

Objetivo General

Comparar y evaluar diferentes planes de intervención para mejorar las vías de acceso a la Comunidad de La Florida de Tibás, a través de la utilización de la Metodología Pavement Condition Index (PCI) y la metodología de Toma de Decisiones Multivariable (MTDMV).

Objetivos Específicos

1. Establecer mediante la metodología PCI, el estado de la carpeta asfáltica de las 3 principales rutas de acceso a la comunidad de la Florida de Tibás. De acuerdo a la delimitación de cada ruta de estudio, se analizarán parcialmente las rutas nacionales 101-102-117, las calles cantonales 5-27-29-31 y las avenidas cantonales 65/67.

2. Realizar una evaluación comparativa del estado de los pavimentos de las distintas rutas de acceso a la comunidad de la Florida de Tibás, utilizando la metodología Paviment Condition Index (PCI).

3. Determinar mediante la metodología de Toma de Decisiones Multivariable, los factores más óptimos para el desarrollo de una propuesta de mantenimiento de la carretera principal comunidad de la Florida de Tibás.

4. Establecer una propuesta de plan de mantenimiento para cada una de las rutas de acceso a la comunidad de la Florida de Tibás, empleando la metodología PCI.

5. Proponer un plan para evaluar los planes de mantenimiento priorizado para las 3 principales carreteras de acceso a la comunidad de la Florida de Tibás, mediante el análisis de los indicadores de la aplicación de la metodología de toma de decisiones multivariable utilizando el software MIVES.

Justificación

La base de esta investigación se centra en la ejecución y aplicación simultánea de diversos criterios técnicos para resolver problemas de infraestructura que aún no se han abordado en Costa Rica. Además, se propone desarrollar un plan de mantenimiento e intervención para mejorar las vías de acceso a una comunidad específica.

El contexto que motivó este proyecto incluye la urgencia y necesidad de la comunidad de La Florida de contar con vías de acceso en buen estado que permitan un tránsito fluido y satisfactorio para sus usuarios. Los vecinos de la zona afectada y todos aquellos que transiten por cualquiera de las tres rutas de acceso se verán beneficiados.

Un aspecto destacado de esta investigación es la utilización de innovaciones tecnológicas, como el software MIVES, para realizar un análisis exhaustivo de datos en las tres rutas de la red vial de Tibás. Este análisis emplea dos metodologías poco comunes entre las autoridades gubernamentales responsables de esta problemática. Por lo tanto, este proyecto puede servir como un punto de partida y una valiosa fuente de información para abordar esta situación, tanto para el cantón de Tibás como para otras regiones que lo necesiten.

Antecedentes

Según Luis Aníbal Guevara Rodríguez (2009) de la Universidad de Ambato en Ecuador, en su estudio titulado *Modelo de mantenimiento vial que permita desarrollar planes de conservación en la capa de rodadura para vías interparroquiales de la provincia de Tungurahua*, los estándares de mantenimiento vial utilizados en el MTOP

(Ministerio de Transporte y Obras Públicas) forman parte de una guía para combinar modelos de mantenimiento vial de otros países, como Estados Unidos y España, y así crear un modelo que integre la mayoría de estos estándares.

En el documento *Plan de mantenimiento vial para uso en caminos pavimentados en la provincia de Tungurahua*, Guevara (2009) señala que la falta de modelos de mantenimiento vial aplicados específicamente a las vías interparroquiales impide una adecuada conservación de la capa de rodadura. La propuesta del autor incluyó una investigación bibliográfica exhaustiva de los parámetros utilizados en Ecuador y en otros países para realizar mantenimiento en la capa de rodadura de las vías. Este modelo establece los parámetros básicos necesarios para elaborar planes de mantenimiento para las vías asfaltadas de la provincia de Tungurahua. Guevara describe en su documento qué modelos de mantenimiento vial permitirán desarrollar planes de conservación adecuados para las vías interparroquiales en la provincia de Tungurahua.

Según María Alexandra Correa Vásquez y Luis Guillermo del Carpio Molero (2019), con el tema *Evaluación PCI y propuesta de intervención para el pavimento flexible del jirón Los Incas de Piura*, de la Universidad de Piura Perú en el año 2019, la ciudad de Piura se encuentra en una situación crítica en cuanto al estado del sector de la ciudad, barrio, red vial nacional y/o internacional, presentando la mayoría de estas vías un importante deterioro. Esta situación se debe en gran medida a que los responsables de la red vial (gobiernos locales, municipios, etc.) no mantienen de forma continua las distintas vías que conectan las ciudades, poniendo de manifiesto la falta de un sistema de intervención vial.

Los autores Correa y Del Carpio (2019) explican en el desarrollo de su tesis cómo el método PCI (índice de condición del pavimento) determina la condición de la superficie del pavimento en el eje de la carretera simplemente examinando cualquier

daño presente en la carretera sin el uso de herramientas especiales. El desarrollo de este método se facilita en gran medida mediante el uso del *software* Eval Pav, que acorta el tiempo para obtener resultados de clasificación sobre las condiciones actuales de varios tramos de carretera. En función de esta clasificación, se proponen las acciones correctoras necesarias para restaurar el estado inicial.

Según Alvin A. Del Rosario Brito, en el año 2017, con el tema *Diseño de un plan de mantenimiento para infraestructuras viales en la República Dominicana. Aplicación a la carretera El Seibo – Hato Mayor*, de la Universidad Politécnica de Valencia, España, se indica que la infraestructura vial es un aspecto fundamental para mejorar el transporte terrestre del país. Mantener un nivel adecuado de servicio a los usuarios requiere intervenciones en forma de mantenimiento. Para lograr los objetivos propuestos, como punto de partida en este trabajo se realizó un levantamiento de información con el objetivo de consultar toda la información necesaria para proceder con éxito con esta investigación. Se analizarán los siguientes aspectos que tienen un impacto significativo en la conservación y mantenimiento de la carretera El Seibo-Hato Mayor: volumen de tráfico anual, historial de accidentes, estado actual, factores económicos e institucionales.

En vista de lo anterior, Del Rosario Brito (2017) considera que dentro de la red vial urbana, el Jirón Los Incas en el distrito de Piura cumple con los requisitos de ejecución de la intervención en su estado actual, teniendo en cuenta el mantenimiento regular y/o periódico. Mantener las vías urbanas en óptimas condiciones y prestar un adecuado servicio durante toda su vida útil.

De acuerdo con Juan Manuel Díaz Cárdenas, de la Universidad Militar de Nueva Granada, Colombia, en el año 2014, con el tema *Evaluación de la Metodología PCI como herramienta para la toma de decisiones en las intervenciones a realizar en los*

pavimentos flexibles, el autor indica que la infraestructura vial es un factor importante para el desarrollo social, económico y cultural de diversas regiones del país. Por lo tanto, es importante considerar las aceras como el activo más importante de la nación. Sin embargo, la condición de las carreteras primarias y secundarias está actualmente por debajo del nivel de competencia requerido para las carreteras intermedias. Intervenir en las carreteras nacionales puede ofrecer beneficios tales como costos operativos reducidos y un desarrollo económico revitalizado en áreas específicas.

Las medidas para reparar y mantener estructuras de pavimentos flexibles son de naturaleza estructural y funcional y ofrecen beneficios cualitativos al permitir un viaje seguro y cómodo. Díaz Cárdenas (2014) explica que la matriz que se presenta en este informe se basa en la experiencia de la *Guía Metodológica de Remediación de Pavimentos Asfálticos* y otros informes de remediación desarrollados para casos específicos. Por lo tanto, sustituye la investigación técnica y la experiencia del diseñador, sirviendo solo como una descripción general o guía. Esto establece una estrategia de intervención inicial y deja en manos de los profesionales de la construcción de carreteras la determinación de las mejores opciones técnico-económicas en función de las condiciones específicas de cada diseño.

Se determinó en el proyecto de Díaz Cárdenas (2014) que el deterioro del pavimento debe considerar todas las capas del pavimento, incluyendo el clima, el tipo de camino, las condiciones económicas, las condiciones y cualquier otra información que se considere apropiada. Esta matriz no pretende reemplazar la gestión de la construcción de carreteras a nivel nacional o territorial, ya que esta actividad debe desarrollarse con el concepto de infraestructura nacional del autor. Sin embargo, la motivación para la creación de este trabajo se basa en la necesidad de proporcionar unas primeras ideas sobre las intervenciones a desarrollar en las vías terciarias, consistentes

en pavimentaciones flexibles en sectores y zonas donde hasta el momento no existen programas de mantenimiento ni *stocks* de vías.

Según Andrés Martín Umaña Barrios, del Tecnológico de Costa Rica, en el año 2015, con el tema *Diseño de la intervención para la estructura de pavimento flexible en secciones representativas de la red vial cantonal de Curridabat*, el objetivo fue recomendar el tipo de diseño para intervenir en las principales vías de Curridabat con estructura de pavimento flexible. Se utilizó una combinación de clasificaciones visuales y técnicas, como la metodología de notas de calidad Q. El proceso comenzó con una auscultación visual de las vías, generando la clasificación mediante el *Pavement Condition Index* (PCI) y recomendando la tasa de intervención según el valor obtenido. Se realizaron ensayos de laboratorio de asfalto, incluyendo deflectometría, TPD y cálculo del IRI, clasificando los resultados según su condición actual para proponer métodos de intervención.

Según Tábora-Cruz (2021), en el documento *Guía de gestión de pavimentos con base en técnicas de preservación de pavimentos flexibles y rígidos*, el proyecto tuvo como objetivo el desarrollo de una guía de gestión de pavimentos para la identificación y selección de técnicas de preservación factibles para pavimentos flexibles y rígidos mediante el uso de herramientas de decisión. La investigación incluyó un estudio de las prácticas actuales con respecto al concepto de preservación de pavimentos y la definición de los deterioros abordados adecuadamente por este. Los resultados mostraron que típicamente la preservación aborda con una alta y moderada efectividad los deterioros en etapas iniciales, es decir, de severidad baja y media respectivamente. Como resultado, se definieron los criterios de aplicabilidad de diferentes técnicas de preservación de pavimentos flexibles y rígidos a través de la generación de un catálogo de técnicas de preservación.

Proyecciones

- Identificación de problemas en las vías de acceso mediante un análisis exhaustivo de las condiciones actuales de las vías de acceso a la comunidad de La Florida en Tibás. Se identificará el deterioro del pavimento, así como la severidad y cantidad de daños presentes en las vías de estudio, utilizando la metodología PCI conforme a la norma ASTM D6433-11.
- Para la evaluación del estado del pavimento se considerarán únicamente aquellas vías y secciones construidas en asfalto o pavimento flexible .
- Los planes de intervención y mantenimiento de las rutas de acceso incluirán una propuesta técnica basada en el análisis de los datos recopilados y el cálculo del PCI.
- Para el análisis de los planes de intervención vial se utilizará exclusivamente la herramienta del Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible, dentro de la metodología de toma de decisiones multivariable.
- Dentro de la metodología del Pavement Condition Index, se recomienda dividir las rutas en secciones específicas para llevar a cabo su evaluación. En lugar de intentar recolectar datos completos y precisos de toda la extensión de las vías en estudio, se sugiere esta división porque recolectar información detallada de los aproximadamente seis kilómetros de recorrido de las rutas implicaría un tiempo considerable, el cual no está disponible. Esta estrategia permitirá una evaluación más eficiente y manejable de las rutas.
- Para establecer una priorización en los planes de mejoramiento vial, se desarrollará un presupuesto teórico aproximado. Este presupuesto se comparará con los recursos financieros reales disponibles para las autoridades encargadas de abordar y solucionar esta problemática. Este enfoque permitirá ajustar los

planes de mejoramiento a las capacidades económicas, asegurando así una planificación más realista y ejecutable.

- Se aplicará la metodología de toma de decisiones multivariable para evaluar y comparar los escenarios de intervención en función de múltiples criterios, como costo, emisión de CO₂, impacto ambiental, entre otros. Además, se aplicará la metodología PCI para evaluar el estado del pavimento en cada escenario.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Definición de Pavimento

Según Coto-Sánchez (2016), el pavimento corresponde a una “estructura estratificada mediante la cual se movilizan los actuales medios de transporte de un lugar a otro sobre su capa superior, llamada superficie de ruedo” (p. 7). Continúa explicando que el pavimento está constituido por “capas horizontales dependiendo de la estructura por construir, conformadas a su vez por materiales adecuados y debidamente compactados” (p. 7). Los pavimentos tienen la función principal de transmitir los esfuerzos generados por el tránsito y llevarlos al suelo de fundación a través de las diferentes capas que los componen, sin que exista alguna falla en los materiales o en la estructura en sí.

El pavimento es una estructura creada con el propósito de resistir las fuerzas generadas por el tránsito de vehículos durante un período determinado por el diseñador. Este objeto estructural está compuesto por múltiples capas que tienen diferentes funciones. En su composición, se encuentran los siguientes elementos.

- Subrasante: Es la última capa o capa inferior y es donde descansa la estructura de las otras capas para formar el pavimento de una carretera.
- Sub-base granular: Es la penúltima capa de la estructura del pavimento y se encarga principalmente de distribuir y transferir uniformemente las cargas que recibe dicha estructura. Además, funciona como drenaje, controlando el ascenso del agua y evitando que dañe las capas superiores.
- Base granular: Se encuentra entre la sub-base y la carpeta final, y tiene como fin transmitir las cargas que recibe hacia las capas inferiores.
- Carpeta: También conocida como superficie de ruedo, su función es formar una capa impermeable que proteja el resto de las capas contra la acción del agua y recibir las cargas de forma directa como consecuencia del tránsito.

(Coronado, 2002).

Según Hernández Bámaca (2020), la principal función de un pavimento es la adecuada transmisión de los esfuerzos a través de su estructura, causados por el tránsito. Además, se requiere que cumpla con ciertos requisitos, tales como:

- Resistencia ante factores ambientales y accidentales.
- Resistencia al desgaste ante el paso del tránsito. Brindar comodidad a los usuarios que transiten sobre el pavimento, presentando regularidad longitudinal y transversal.
- Dar seguridad a los usuarios a través de una textura superficial adaptada a las velocidades de circulación.
- Drenar eficientemente el agua con sistemas adecuados para tal fin.
- Debe reflejar la luz o tener componentes o señales reflectoras para seguridad de los usuarios.
- Garantizar durabilidad.
- Poseer una superficie uniforme que minimice los efectos del ruido del contacto entre el neumático y el pavimento.
- Deber ser económico, pero sin afectar las demás funciones. (p. 7-8)

Tipos de pavimento

Usualmente, el pavimento se clasifica de acuerdo con los materiales empleados en su estructura y se divide en los siguientes tipos:

Pavimento rígido: se caracteriza por tener una capa de concreto como superficie principal. La colocación de la sub-base granular es opcional.

Pavimento flexible: se distingue del pavimento rígido en que muestra todas sus capas y su superficie está compuesta por una combinación de asfalto.

A continuación, se explica cada uno en detalle.

Pavimentos Flexibles método de la AASHTO 93

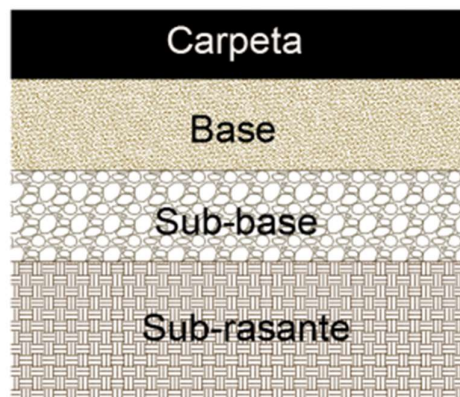
Según Coto-Sánchez (2016):

El pavimento rígido se constituye de una losa de concreto apoyada sobre una capa de un material adecuado y debidamente compactado, generalmente llamada sub-base, o directamente colocada sobre la sub-rasante sin la necesidad de otras capas. La razón por la cual el pavimento de concreto no necesita de otras capas de apoyo, como si lo requiere el pavimento flexible, se debe principalmente a la alta rigidez del concreto hidráulico, por lo que la distribución se da en un área más amplia. Además, como el concreto puede resistir esfuerzos a tensión, en cierta medida, entonces un pavimento rígido es satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la sub-rasante, por lo que la capacidad estructural de este pavimento depende de las losas de concreto hidráulico, siendo las demás capas de apoyo innecesarias o de poca influencia en función del espesor de la estructura. (p. 9)

La estructura del pavimento rígido se representa en la siguiente figura.

Figura 1.

Estructuración de pavimento flexible



Nota. Extraído de Coto-Sánchez (2016).

Pavimentos Rígidos método de la AASHTO 93

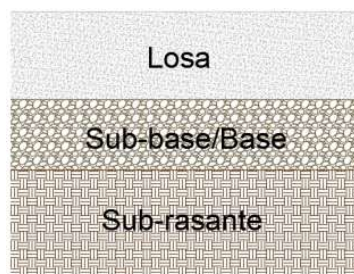
De acuerdo con Coto-Sánchez (2016):

El pavimento rígido se constituye de una losa de concreto apoyada sobre una capa de un material adecuado y debidamente compactado, generalmente llamada sub-base, o directamente colocada sobre la sub-rasante sin la necesidad de otras capas. La razón por la cual el pavimento de concreto no necesita de otras capas de apoyo, como si lo requiere el pavimento flexible, se debe principalmente a la alta rigidez del concreto hidráulico, por lo que la distribución se da en un área más amplia. Además, como el concreto puede resistir esfuerzos a tensión, en cierta medida, entonces un pavimento rígido es satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la sub-rasante, por lo que la capacidad estructural de este pavimento depende de las losas de concreto hidráulico, siendo las demás capas de apoyo innecesarias o de poca influencia en función del espesor de la estructura. (p. 9)

La estructura del pavimento rígido se representa en la siguiente figura.

Figura 2.

Estructuración de pavimento rígido



Nota. Tomado de Coto-Sánchez (2016).

Un pavimento rígido está conformado por una losa de concreto sobre la subrasante o un material granular. Existen varios tipos, pero el más común en Costa Rica es el pavimento de concreto con juntas (JPCP, por sus siglas en inglés). Este tipo

de pavimento no tiene refuerzo y sus losas son lo suficientemente cortas como para evitar esfuerzos térmicos que excedan la resistencia de la losa a la flexotracción. El método de la AASHTO para pavimentos rígidos es un método empírico que se utiliza para el diseño de pavimentos. Consiste en determinar el espesor de losa requerido en función de una serie de parámetros de diseño, con el propósito de asegurar un nivel de confianza específico de que el índice de condición del pavimento (PSI) no caiga por debajo de un mínimo dado, a la aplicación de las cargas de diseño (Yang H & Huang, 2004).

Generalidades de los pavimentos flexibles y rígidos

Según lo establecido por Ruiz (2008), a continuación se presentan algunos aspectos generales de los pavimentos flexibles o asfálticos y los pavimentos rígidos, con el fin de mostrar criterios que permiten diferenciar ambos tipos de pavimentos. Además de los aspectos técnicos, se abordarán otros puntos de importancia.

Considerando lo anterior, típicamente se establecen dos criterios diferenciales entre estos tipos de pavimentos, los cuales son:

Tabla 1.

Criterios diferenciales entre estos dos tipos de pavimentos

Criterio	Descripción
Criterio económico:	Se refiere al costo inicial de cada alternativa, al costo de conservación de la misma en un determinado ciclo de vida y al costo de operación de los vehículos que transiten por el pavimento considerado.
Criterio funcional:	Se refiere a que tan bien servirá a los usuarios cada una de las alternativas, es decir, lo anterior también considera los inconvenientes que cada tipo de pavimento tendrá con respecto a la fluidez del tránsito

producto de las acciones de conservación importantes que requiera cada estructura.

Nota. Elaboración propia a partir de Ruiz (2008).

Análisis de costos

Tábora-Cruz (2021) explica que la principal diferencia entre ambos tipos de pavimentos radica en el costo de inversión inicial de construcción, sin dejar de considerar el equilibrio con los costos de mantenimiento y operación del transporte. La inversión inicial para la construcción de un pavimento asfáltico suele ser menor que la requerida para un pavimento de concreto. Sin embargo, los pavimentos de concreto hidráulico, al tener una vida útil mayor, requieren menos gastos de mantenimiento y facilitan los trabajos de reparación. Por lo tanto, a largo plazo, resultan ser más económicos que los pavimentos asfálticos durante su vida útil. En este análisis se considera no solo el costo inmediato, sino también el costo de mantenimiento de ambos tipos de pavimentos a lo largo de 20 a 25 años (p. 21-22).

Funcionalidad y operación

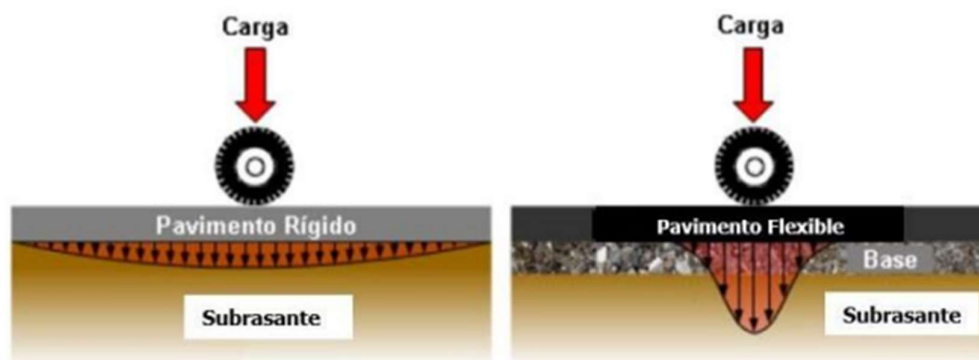
Tábora-Cruz (2021) señala que los pavimentos rígidos suelen especificarse para una vida útil mínima de 25 años, en comparación con los pavimentos flexibles, cuyo periodo de vida útil se considera generalmente entre 10 y 20 años. En cuanto a la operación, el nivel de confort que experimentan los usuarios a bordo del vehículo es mayor en pavimentos asfálticos que en pavimentos rígidos. Esto se debe a la flexibilidad del pavimento asfáltico y a que, en ocasiones, la superficie de rodadura está compuesta por una mezcla asfáltica distribuida en varias capas, a diferencia de los pavimentos de concreto, que consisten en una sola losa (p. 23).

Diseño

Tábora-Cruz (2021) explica que las diferencias en el diseño de los pavimentos radican en la manera en que distribuyen las cargas al suelo de soporte (subrasante), como se observa en la Figura 3. En un pavimento rígido, la rigidez de la losa de concreto permite una buena distribución de las cargas de las ruedas de los vehículos, resultando en esfuerzos muy bajos en la subrasante. Debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, los pavimentos rígidos basan su capacidad portante en la losa de concreto más que en la capacidad de la subrasante. En contraste, los pavimentos flexibles se caracterizan por ser sistemas de múltiples capas, con las capas de mejor calidad ubicadas cerca de la superficie, donde los esfuerzos son mayores. Generalmente, la capa superior de rodadura está compuesta por concreto asfáltico. En los pavimentos flexibles, la carga se distribuye desde las capas superiores hacia las inferiores hasta llegar a un nivel aceptable para la subrasante (p. 23).

Figura 3.

Comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos



Nota. Tomado de Tábora-Cruz (2021, p. 24).

Seguridad

El factor seguridad es de vital importancia para ambos tipos de pavimentos. Según Tábora-Cruz (2021), se exige el cumplimiento de especificaciones en el diseño y la construcción de estos sistemas para garantizar superficies de rodadura seguras para los usuarios (p. 24).

Es fundamental asegurar la seguridad de los usuarios mediante prácticas constructivas adecuadas, considerando los procesos necesarios previos a cualquier intervención. Esto garantiza que el pavimento proporcione un desempeño óptimo y reduzca el riesgo de accidentes o fallos graves.

Deterioro del pavimento

Tábora-Cruz (2021) explica que los deterioros en las estructuras de pavimentos corresponden a los daños visibles en la superficie de rodadura, resultantes de la interacción de diversos factores, tales como las cargas del tránsito, el medio ambiente, las prácticas de diseño y construcción, las condiciones de soporte, los materiales y los procedimientos de mantenimiento. Estos deterioros afectan la condición de circulación segura y confortable y pueden incrementar los costos de operación vehicular (Peshkin et al., 2011). De acuerdo con lo mencionado, los deterioros en un pavimento se consideran cualquier defecto visible o forma de deterioro en su superficie y son la medida más básica del desempeño del pavimento (Smith et al., 2014).

En la siguiente tabla se mencionan algunos factores relacionados con las causas principales por las que se deteriora un pavimento de acuerdo con Cruz (2013).

Tabla 2.

Causas principales por las que se deteriora un pavimento.

Causa	Descripción
Efecto de las cargas de tránsito:	Se refiere al efecto de las continuas repeticiones de carga causadas por el tránsito, los cuales generan deterioros críticos que afectan el desempeño del pavimento.
Efectos del medio ambiente:	Las condiciones ambientales tales como temperaturas extremas, intemperismo, lluvias, fenómenos meteorológicos, sismos y derrumbes se destacan como una de las principales causas de deterioros en los pavimentos.
Prácticas de diseño:	Se refiere al conjunto de actividades relacionadas con las normativas de diseño geométrico y estructural de una obra vial y a la selección del tipo de pavimento para una determinada zona.
Prácticas de construcción:	Está relacionado con las deficiencias en la ejecución de los procesos constructivos, deficiencia en la elección del equipo de construcción y en especial a la carencia de un control de calidad que afectan el comportamiento de la estructura en conjunto.
Calidad de los materiales:	Relacionadas con las actividades de selección de los materiales adecuados para las condiciones específicas de cada proyecto y la carencia del control de calidad de los materiales.
Deficiencias de mantenimiento:	Generalmente ligada a la mala selección de las estrategias o acción tardía de las mismas.

Nota. Elaboración propia a partir de Cruz (2013).

Según Peshkin et al. (2011, citado por Tábora-Cruz, 2021) los deterioros se pueden dividir en dos grandes categorías.

- Deterioro funcional: Deterioro que afecta la capacidad del pavimento para proporcionar una superficie segura, uniforme y cómoda para conducir. La mayoría de los problemas funcionales se pueden corregir con técnicas de preservación si no hay un problema estructural subyacente grave.
- Deterioro estructural: Deterioro causado por carga excesiva, espesor insuficiente o falta de soporte estructural. Los pavimentos con dificultades estructurales considerables no son buenos candidatos para la aplicación de técnicas de preservación. (p. 26)

Smith et al. (2014, citado por Tábora-Cruz, 2021), establece que, para describir completamente el deterioro del pavimento, se deben considerar los siguientes tres factores.

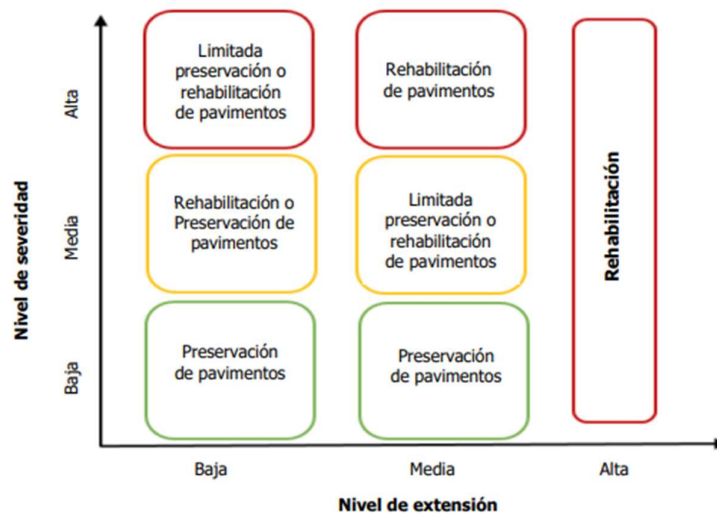
- Tipo: el tipo de deterioro está determinado principalmente por mecanismos similares de ocurrencia y apariencia. Al identificar los tipos de deterioro, se puede inferir una gran cantidad de información sobre las causas subyacentes del deterioro.
- Severidad: la severidad representa la criticidad del deterioro en términos de progresión; es decir, los deterioros con una severidad más alta requerirán alternativas de tratamiento más extremas.
- Extensión: este factor corresponde a la cantidad y el nivel de severidad de cada tipo de deterioro, las cuales deben medirse y registrarse. Los niveles de severidad y extensión de los deterioros se utilizan como parámetros para clasificar la condición del pavimento.(p.26-27). Los niveles de severidad son criterios adoptados para diferenciar la gravedad del daño, estos se basan

fundamentalmente en la apreciación del grado de deterioro que pueda presentar cada daño en particular. En términos generales los niveles de severidad adoptados para este trabajo son: severidad baja, severidad media y severidad alta (p. 31).

La siguiente figura muestra la relación entre severidad y extensión.

Figura 4.

Relación entre características de deterioros y estrategias de intervención



Nota. Tomado de Tábora-Cruz (2021, p. 27).

Por lo tanto, para uniformizar la valoración de los deterioros y facilitar la validación de la guía posteriormente, en el presente documento se utilizará el Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica (MAV 2016) para ambos tipos de pavimento. Este manual es un catálogo completo basado en la norma ASTM D6433 (Práctica Estándar para la Determinación del Índice de Condición de Carreteras y Estacionamientos). Incorpora estudios internacionales relevantes y se complementa con otros manuales de auscultación, tales como:

- Catálogo de Deterioro de Pavimentos. Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica (2002).
- Manual de Identificación de deterioros para el programa de desempeño de pavimentos a largo plazo (FHWA,2014).
- Manual Para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles y Rígidos (INVIAS,2006). • Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica (MAV,2016) (MOPT 2016).
- ASTM D6433 (2018). Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. Pennsylvania, United States: ASTM International.

Según el Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica (MAV, 2016), en la tabla 4 se resumen los deterioros que pueden presentar una estructura de pavimento flexible y rígida, clasificándolos en las siguientes categorías:

Tabla 3.

Clasificación de categorías de deterioro de pavimentos flexibles y rígidos

Pavimentos flexibles	Pavimentos rígidos
Grietas	Grietas
Textura superficial	Deterioro superficial
Deformaciones	Juntas
Misceláneos	Misceláneos

Nota. Elaboración a partir del autor (MOPT, 2016).

Deterioros y Fallas en los pavimentos

En el proceso de inspección visual para la metodología del Índice de Estado de la Carretera, los daños en pavimentos flexibles se categorizan en cuatro grupos para determinar el Índice de Estado de la Carretera. Según el *Catálogo de Deterioros del*


Manual de Auscultación Vial del MOPT. Guía para Profesionales (2016), los deterioros se clasifican de la siguiente manera:

- Grupo 1 / Grietas: Cuero de Lagarto, grieta longitudinal-transversal, reflejo de juntas, en bloque, de borde y en arco.
- Grupo 2 / Deformaciones: Ahuellamiento, Abultamiento y hundimiento, corrugación, depresión, hinchamiento y desplazamiento.
- Grupo 3 / Textura Superficial: Exudación, pulimiento de agregados, desprendimiento de agregados y desgaste superficial.
- Grupo 4 / Misceláneos: Escalonamiento calzada-espaldón, bache, hueco y cruce de línea férrea.

A partir del catálogo de evaluación visual del pavimento, se presentan las características de cada una de las categorías de deterioro:

Tabla 4.

Deterioros y sus principales características, Categoría 1. Grietas

Categoría 1. Grietas			
Nombre e ilustración	Detalle del Deterioro	Criterios de Severidad	Posible medida de intervención según severidad
1.1 Cuero de Lagarto 	El Cuero de Lagarto consiste en una serie de grietas interconectadas causadas debido a la falla por fatiga (paso repetido de vehículos), las grietas se propagan del fondo de la capa de mezcla asfáltica hacia arriba. Unidad de Medida: m ²	Bajo: Grietas Paralelas en buen estado y sin grietas en bordes. Medio: Mallas entre 20x20 cm y 50x50 cm, inicia la interconexión. Alto: Mallas menores a 20x20 cm que simulan un cuero de lagarto.	Bajo y Medio: Sellos asfálticos, tratamientos Superficiales asfálticos. Alto: Bacheo (para casos puntuales) o sustitución de capa asfáltica.
1.2 Grieta Longitudinal	Las grietas longitudinales son paralelas a la línea de centro de la carretera y las transversales se extienden a	Bajo: Ancho menor a 6mm o selladas en buenas condiciones y con un ancho que no se puede medir, sin ramificaciones en los bordes.	Bajo y Medio: Sellado de fisuras o grietas.



través del pavimento en ángulos rectos con respecto a la línea de centro de la carretera (dirección de avance de los vehículos).

Unidad de Medida: m.l.

Medio: Ancho mayor a 6mm y menor a 19mm o, menor a 19mm con ramificaciones pequeñas o grieta sellada rodeada de ramificaciones pequeñas.

Alto: Ancho mayor a 19mm o grieta sellada con ramificaciones grandes e importantes. Bordes de grieta normalmente degradados.

Alto: Sellado de fisuras y grietas o bacheo.

1.3 Reflejo de Juntas



Este deterioro ocurre solamente en pavimentos asfálticos en que se haya colocado una carpeta asfáltica sobre una capa de concreto formada por losas.

Unidad de Medida: m²

Mismos criterios que la grieta longitudinal según su severidad.

Bajo y Medio: Sellado de fisuras o grietas.

Alto: Sellado de fisuras y grietas o bacheo.

1.4 Grietas en Bloque



Las grietas en bloque son grietas interconectadas que dividen el pavimento en piezas aproximadamente rectangulares, los bloques van generalmente de 0,3 m x 0,3 m a 3 m x 3 m.

Unidad de Medida: m²

Bajo: Las grietas del bloque son definidas por los criterios correspondientes al deterioro de "Grieta longitudinal y transversal" de severidad baja.

Medio: Las grietas del bloque son definidas por los criterios correspondientes al deterioro de "Grieta longitudinal y transversal" de severidad media.

Alto: Las grietas del bloque son definidas por los criterios correspondientes al deterioro de "Grieta longitudinal y transversal" de severidad alta.

Bajo: Sellado de fisuras y grietas, Sellos asfálticos, tratamientos Superficiales asfálticos.

Medio: Sellos asfálticos, tratamientos superficiales asfálticos.

Alto: Sustitución de capa asfáltica

1.5 Grietas de Borde



Las grietas de borde son paralelas y usualmente separadas de 0,3 a 0,5m del borde externo del pavimento.

Unidad de Medida: m.l.


Bajo: Agrietamiento bajo o medio definido por los criterios correspondientes al deterioro de "Grieta longitudinal y transversal", sin fracturas ni desprendimiento de agregado.

Medio: Agrietamiento medio definido por los criterios correspondientes al deterioro de "Grieta longitudinal y transversal" con algunas fracturas y desprendimiento de agregado.

Bajo: Sellado de fisuras y grietas

Medio y Alto: Evaluación de las condiciones de drenaje y atención de las mismas.


Reconstruir los espaldones colocando material perfectamente compactado y al menos revestido con un TS. Sellar las áreas comprometidas





		Alto: Existen fracturas y desprendimiento de agregado considerable a través del borde del pavimento.	
<p>1.6 Grietas en Arco</p> 	<p>Este tipo de grieta posee una forma de arco o media luna y generalmente son transversales a la dirección del flujo vehicular.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	<p>Bajo: El ancho promedio de la grieta es menor a 10 mm.</p> <p>Medio: El ancho promedio de la grieta está entre 10 mm y 40 mm o el área alrededor de la grieta está ligeramente fracturada.</p> <p>Alto: El ancho promedio de la grieta es mayor a 40 mm o el área alrededor de la grieta está fracturada en pedazos que se pueden mover.</p>	<p>Bajo y Medio: Bacheo.</p> <p>Alto: Bacheo (para casos puntuales) o sustitución de capa asfáltica.</p>

Nota: Fuente: *Catálogo de Deterioros del Manual de Auscultación Vial* del MOPT: Guía para Profesionales (2016).

Tabla 5.

Deterioros y sus principales características, Categoría 2. Deformaciones

Categoría 2. Deformaciones			
Nombre e ilustración	Detalle del Deterioro	Criterios de Severidad	Posible medida de intervención según severidad
<p>2.1 Roderas o Ahuellamiento</p> 	<p>Una rodera es una depresión en las huellas del vehículo. Se puede dar un levantamiento en los bordes de las roderas. Las roderas se derivan de una deformación permanente que puede proceder de cualquier capa del pavimento o de la sub-rasante, usualmente su causa se asocia a consolidación o movimiento lateral de los materiales.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	<p>Bajo: La profundidad promedio es de 6 mm a 13 mm.</p> <p>Medio: La profundidad promedio es de 13 mm a 25 mm.</p> <p>Alto: La profundidad promedio es mayor a 25 mm.</p>	<p>Bajo: Bacheo (para casos puntuales) o tratamiento superficial o sellos asfálticos.</p> <p>Medio: Bacheo (para casos puntuales), tratamientos superficiales asfálticos, sustitución de capa asfáltica o colocación de sobrecapa asfáltica.</p> <p>Alto: Sustitución de capa asfáltica (perfilado y carpeteo).</p>

<p>2.2 Abultamiento y Hundimiento</p> 	<p>Los abultamientos son desplazamientos hacia arriba de la carpeta asfáltica que generalmente son pequeños y localizados.</p> <p>Los hundimientos por lo contrario son desplazamientos abruptos hacia abajo, que igual que los abultamientos generalmente son localizados.</p> <p>Unidad de Medida: m.l.</p>	<p>Bajo: Calidad de ruedo de severidad baja, con una deformación vertical aproximada de 3 mm a 50 mm.</p> <p>Medio: Calidad de ruedo de severidad media, con una deformación vertical aproximada de 50 mm a 100 mm.</p> <p>Alto: Calidad de ruedo de severidad alta, con una deformación vertical aproximada de más de 100 mm.</p>	<p>Bajo: Bacheo.</p> <p>Medio y Alto: Bacheo (para casos puntuales) o Sustitución de capa asfáltica</p>
<p>2.3 Corrugación</p> 	<p>La corrugación es una serie de crestas y valles que ocurren a intervalos regulares (usualmente menos de 3m) a través del pavimento y en dirección perpendicular a la de avance de los vehículos.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	<p>Bajo: Calidad de ruedo de severidad baja, levantamiento menor a 20 mm.</p> <p>Medio: Calidad de ruedo de severidad media, levantamiento entre 20 mm y 50 mm.</p> <p>Alto: Calidad de ruedo de severidad alta, levantamiento mayor a 50 mm.</p>	<p>Bajo: Evaluar el área afectada para definir la intervención idónea (No hacer nada, perfilado, entre otras).</p> <p>Medio y Alto: Sustitución de capa asfáltica.</p>
<p>2.4 Depresión</p> 	<p>Las depresiones son áreas localizadas ligeramente más bajas que la superficie del pavimento circundante.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	<p>Bajo: De 13 mm a 25 mm de profundidad en el punto más hondo.</p> <p>Medio: De 25 mm a 50 mm de profundidad en el punto más hondo.</p> <p>Alto: Más de 50 mm de profundidad en el punto más hondo.</p>	<p>Bajo: Bacheo.</p> <p>Medio y Alto: Bacheo (para casos puntuales) o sustitución de capa asfáltica.</p>
<p>2.5 Hinchamiento</p> 	<p>Los hinchamientos se caracterizan por un abultamiento de la superficie del pavimento creando una onda larga de más de 3 metros.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	<p>Bajo: Calidad de ruedo de severidad baja, levantamiento se encuentra entre 13 mm y 25 mm en el punto más alto.</p> <p>Medio: Calidad de ruedo de severidad media, levantamiento entre 25 mm y 50 mm en el punto más alto.</p> <p>Alto: Calidad de ruedo de severidad alta, levantamiento mayor a 50 mm</p>	<p>Bajo: Bacheo.</p> <p>Medio y Alto: Bacheo (para casos puntuales) o estabilización de la capa granular afectada y sustitución de capa asfáltica.</p>
<p>2.6 Desplazamiento</p>	<p>El corrimiento es un desplazamiento longitudinal permanente de un área localizada de la superficie del pavimento causado por las cargas del tránsito.</p>	<p>Bajo: Calidad de ruedo de severidad baja, profundidad o elevación máxima de 10 mm, causa cierta vibración o balanceo en el vehículo, sin generar incomodidad.</p>	<p>Bajo: Bacheo.</p> <p>Medio y Alto: Bacheo (para casos puntuales) o sustitución de capa asfáltica</p>



Cuando el tránsito presiona el pavimento produce una onda abrupta y corta sobre la superficie del mismo.

Unidad de Medida: m²


Medio: Calidad de ruedo de severidad media, profundidad o elevación máxima se encuentra entre 10 mm y 20 mm, el corrimiento causa una significativa vibración o balanceo al vehículo, que genera cierta incomodidad.




Alto: Calidad de ruedo de severidad alta, profundidad o elevación máxima es igual o mayor a 20 mm, el corrimiento causa a los vehículos un excesivo balanceo que genera una sustancial incomodidad y/o riesgo para la seguridad de circulación, siendo necesaria una reducción de la velocidad.

Nota: Fuente: *Catálogo de Deterioros del Manual de Auscultación Vial* del MOPT: Guía para Profesionales (2016).

Tabla 6.

Deterioros y sus principales características, Categoría 3. Textura Superficial

Categoría 3. Textura Superficial			
Nombre e ilustración	Detalle del Deterioro	Criterios de Severidad	Posible medida de intervención según severidad
<p>3.1 Exudación</p> 	<p>La exudación es una película delgada de ligante asfáltico en la superficie de la carpeta asfáltica que crea un pequeño reflejo y que generalmente es pegajosa.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	<p>Bajo: La exudación ha ocurrido en pequeña medida y solo se nota durante algunos días del año, el asfalto no se pega a los zapatos o vehículos, se hace visible la coloración algo brillante de la superficie.</p> <p>Medio: La exudación ha ocurrido de tal forma que el asfalto se adhiere a los zapatos o vehículos durante algunas semanas del año, con exceso de asfalto libre que forma una película continua en las huellas de canalización del tránsito.</p> <p>Alto: La exudación ha ocurrido de tal forma que el asfalto se adhiere a los zapatos o vehículos considerablemente durante muchas semanas del año, presencia de una</p>	<p>Bajo y medio: Sello de arena o polvo de piedra.</p> <p>Alto: Sustitución de capa asfáltica.</p>




		cantidad significativa de asfalto libre, le da a la superficie un aspecto "húmedo", de intensa coloración negra.	
3.2 Pulimiento de Agregados 	<p>El pulimiento de agregado está presente si al realizar un examen visual de la capa asfáltica se observa que la porción de agregado que se extiende por encima del asfalto las partículas no son suficientemente ásperas para proporcionar buena resistencia al deslizamiento.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	No posee criterios de severidad.	Sellos asfálticos, tratamientos superficiales asfálticos o recarpeteo con material no propenso al pulimiento.
3.3 Desprendimiento de Agregados 	<p>Se da por un desprendimiento de partículas de agregado grueso.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	<p>Bajo: No Aplica</p> <p>Medio: Desprendimiento considerable de agregados, al menos 20 partículas de agregado por metro cuadrado.</p> <p>Alto: La superficie se encuentra muy rugosa por la falta de agregado grueso, puede estar completamente desprendida en lugares.</p>	<p>Bajo: No aplica.</p> <p>Medio: Sellos asfálticos, tratamientos superficiales asfálticos.</p> <p>Alto: Sellos asfálticos, tratamientos superficiales asfálticos o colocación de sobrecapa asfáltica.</p>
3.4 Desgaste Superficial 	<p>Es el desgaste de la matriz de agregado fino y ligante asfáltico.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	<p>Bajo: La superficie del asfalto empieza a mostrar signos de envejecimiento que puede ser acelerado por las condiciones climáticas. La pérdida de la matriz de agregado fino es notable y puede ir acompañada de la decoloración del color del asfalto. El pavimento puede ser relativamente nuevo (6 meses).</p> <p>Medio: La pérdida de la matriz de agregado fino es notable y los bordes de agregado grueso pueden estar expuestos hasta ¼ de la anchura (del lado más largo) del agregado grueso debido a la pérdida de la matriz de agregado fino.</p> <p>Alto: Los bordes de los agregados gruesos se han expuesto más de ¼ de ancho (del lado más largo) del agregado grueso. Existe una considerable pérdida de la matriz de</p>	<p>Bajo: Evaluar el área afectada para definir la intervención idónea.</p> <p>Medio y Alto: Sellos asfálticos, tratamientos superficiales asfálticos</p>

agregado fino que conduce a potencial o alguna pérdida de agregado grueso.


Nota: Fuente: *Catálogo de Deterioros del Manual de Auscultación Vial* del MOPT: Guía para Profesionales (2016).

Tabla 7.

Deterioros y sus principales características, Categoría 4. Misceláneos

Categoría 4. Misceláneos			
Nombre e ilustración	Detalle del Deterioro	Criterios de Severidad	Posible medida de intervención según severidad
<p>4.1 Escalonamiento</p> <p>Calzada-Espaldón</p> 	<p>El escalonamiento es una diferencia en elevación entre el borde del pavimento y el espaldón.</p> <p>Unidad de Medida: m.l.</p>	<p>Bajo: La diferencia en elevación entre la calzada y el espaldón es mayor a 25 mm y menor a 50 mm.</p> <p>Medio: La diferencia en elevación entre la calzada y el espaldón es mayor a 50 mm y menor a 100 mm.</p> <p>Alto: La diferencia en elevación entre la calzada y el espaldón es mayor a 100 mm.</p>	<p>Para todos los casos: Nivelación del espaldón cuando el escalonamiento es producto de problemas en la fundación o erosión.</p>
<p>4.2 Bache</p> 	<p>Un bache es un área de pavimento que ha sido reemplazada con material nuevo para reparar el pavimento existente, un bache es considerado un defecto no importa su desempeño y estado.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	<p>Bajo: El bache se encuentra en buena condición y la calidad de ruedo es de severidad baja o mejor.</p> <p>Medio: El bache está moderadamente deteriorado o la calidad de ruedo de severidad media o ambos.</p> <p>Alto: El bache se encuentra muy deteriorado o la calidad de ruedo es de severidad alta o ambos.</p>	<p>Bajo y Medio: Evaluar el área afectada para definir la intervención idónea.</p> <p>Alto: Sustitución del bache (bacheo, para casos puntuales) o sustitución de capa asfáltica</p>
<p>4.3 Hueco</p> 	<p>Los huecos son depresiones en la superficie del pavimento que poseen forma de tazón, usualmente el diámetro es menor a 750mm. Generalmente poseen bordes afilados y paredes verticales cerca de la superficie del hueco.</p> <p>Unidad de Medida: Unidad</p>	<p>Si el hueco posee un diámetro mayor a 750 mm se debe dividir el área entre 0.5 m² y encontrar el número equivalente de huecos y si la profundidad es 25 mm o menos los huecos son considerados de severidad media, si la profundidad es más de 25 mm de severidad alta según la siguiente tabla:</p>	<p>Para todos los casos: Bacheo (para casos puntuales) o sustitución de capa asfáltica</p>

Profundidad máx.	Diámetro promedio		
	100 a 200mm	200 a 450mm	450 a 750mm
13 a <25mm	B	B	M
25 a 50mm	B	M	A
>50mm	M	M	A

<p>4.4 Cruce de Línea Férrea</p> 	<p>Hundimientos o abultamientos del pavimento cerca de las líneas férreas.</p> <p>Unidad de Medida: m²</p>	<p>Bajo: Calidad de ruedo de severidad baja, con una deformación vertical aproximada de 3 mm a 50 mm.</p> <p>Medio: Calidad de ruedo de severidad media, con una deformación vertical aproximada de 50 mm a 100 mm.</p> <p>Alto: Calidad de ruedo de severidad alta, con una deformación vertical aproximada de más de 100 mm.</p>	<p>Para todos los casos: Corrección de los bordes utilizando bacheo con concreto asfáltico, respetando el derecho de vía de la línea férrea.</p>
---	---	--	--

Nota: Fuente: *Catálogo de Deterioros del Manual de Auscultación Vial* del MOPT: Guía para Profesionales (2016).

Metodología del Paviment Condition Index (PCI)

Este enfoque sigue las pautas establecidas por la American Society for Testing and Materials en su estándar titulado *Método convencional para evaluar la condición del pavimento en carreteras y estacionamientos* (ASTM D6433). Para implementar correctamente este procedimiento, es necesario contar con un nivel adecuado de conocimiento técnico y teórico. Por lo tanto, se recomienda que la aplicación sea realizada por personal capacitado o bajo la supervisión de un profesional, para evitar posibles errores que puedan afectar la ejecución del procedimiento.

Debido a que este procedimiento sigue una normativa establecida, cualquier variación o equivocación podría generar datos incorrectos y resultar en una aplicación defectuosa del proceso. A continuación, se detalla el protocolo utilizado para aplicar la norma ASTM D6433, según los autores Cuellar Centeno (2022) y Malo Domínguez (2020).

Unidades de Muestreo (UM)

Las unidades de muestreo se establecen en función del tipo de proyecto, las características del pavimento y, en algunos casos, las particularidades específicas de la sección de la carretera. Se toma en cuenta la distancia de la carretera y el tamaño de su carril para determinar la cantidad adecuada de unidades de muestreo necesarias para realizar la inspección visual y recopilar información. Con base en esto, la vía se fragmenta en segmentos o secciones para su examen.

Longitud de la unidad de muestreo

Es necesario determinar el ancho de la calzada que se estudiará o su promedio en caso de que varíe. Para esto, se puede consultar la siguiente tabla que muestra los diferentes anchos de calzada.

Tabla 8.

Longitud de Unidad de muestra según ancho de calzada

Ancho de Calzada (m)	Longitud de UM (m)
3.5 - 6.5	47
4.0 – 7.5	42
4.5 – 8.5	38
5.0 – 9.0	35
5.5 10 Máx.	31

Nota. Tomado del *Manual de Auscultación Vial* del MOPT

Según lo establecido en el manual mencionado, es responsabilidad del usuario decidir el ancho de la carretera que desea evaluar, el cual puede variar dentro de un rango de valores.

Número Total de UM (N)

El valor total de cada sección de carretera o muestra se denota como NNN, que representa el número de unidades de muestreo a ser evaluadas. El cálculo se realiza mediante la fórmula siguiente:

$$N = \frac{\text{Long. Proyecto}}{\text{Long. Um}}$$

En donde Long. Proyecto es la longitud total en estudio y Long. UM es la longitud seleccionada por el usuario para usar como longitud de cada tramo.

Número Mínimo de UM a inspeccionar (n)

Con el objetivo de ahorrar tiempo, se selecciona únicamente una cantidad específica de secciones que representen la totalidad de la carretera en cuestión. Por lo general, se eligen las unidades más representativas de la vía, evitando aquellas con un nivel de deterioro inferior, para obtener resultados más precisos. Para realizar este cálculo, se emplea la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\frac{e^2}{4} * (N - 1) + \sigma^2}$$

En este caso, N representa el número total de Unidades de Medida (UM), e se refiere al error aceptable que es igual al 5%, y σ indica la desviación estándar del Índice de Capacidad Portante (PCI) en un pavimento flexible, que tiene un valor de 10. Esta tabla es utilizada por algunas administraciones como criterio técnico:

Tabla 9

Criterio de selección de UM a inspeccionar

Unidad de muestra en la sección (N)	Número de Unidades a inspeccionar (n)
1 – 5	1
6 – 10	2
11 – 15	3
16 – 40	4
Más de 40 pero menos de 200	10% (redondear hacia arriba la próxima unidad de muestra)

Nota. Tomado del *Manual de Auscultación Vial* del MOPT

Escogencia de UM a inspeccionar

Se adopta el principio de muestreo aleatorio y se selecciona el valor inicial de n para que sea constante, de modo que los datos recopilados no se utilicen y el resultado también sea pequeño. Luego se les anima a completar el UM para su revisión seleccionando unidades adicionales según el método que se está estudiando. En este caso se tiene que utilizar el tiempo de muestreo (i), que permite determinar la diferencia entre UM para medir y calcular lo siguiente:

$$i = \frac{N}{n}$$

Además, el primer valor de n (llamado s) debe elegirse al azar. El valor debe estar entre 1 y 5, por lo que se mostrarán las siguientes UM: " s ", " $s+i$ ", " $s+2i$ "... " $s+ni$ ", en el mismo orden hasta el final del UM

Se deben considerar tanto análisis prácticos y de campo como el trabajo teórico en curso. El paso final consiste en recopilar datos para un grupo de muestra mediante la observación y el registro de información sobre las carreteras, dependiendo de la naturaleza de estas. En el presente trabajo, el pavimento flexible predomina en la vía, y se extraen cada deterioro o desperfecto que se encuentre. Por lo tanto, es fundamental utilizar el manual para evaluar con precisión el daño actual y obtener cálculos correctos del PCI.

Para las labores de inspección visual, se seguirá el Manual de Auscultación Vial del MOPT. Guía para Profesionales (2016), que incluye el Catálogo de Deterioro. Este catálogo clasifica y ejemplifica los tipos de deterioro según su forma, aspecto y nivel de severidad, permitiendo así realizar los cálculos correspondientes. El catálogo sugiere contar con el siguiente equipo:

- Odómetro manual para medir las longitudes y las áreas de los daños.

- Un odómetro que permita medir distancias largas con buena precisión, ya que para proyectos grandes la distancia entre unidades puede llegar a ser significativa. Ej. Odómetro externo que se adhiere al automóvil.
- Regla de tres metros y una cinta métrica para establecer las profundidades de los ahuellamientos (roderas) o depresiones.
- Regla pequeña para medir los anchos de grieta.
- Lápiz y borrador.
- Hojas de Deterioros con los formatos correspondientes y en cantidad suficiente para el desarrollo de la actividad.
- Chalecos y conos refractivos para garantizar la seguridad del personal que realiza la auscultación, entre otros implementos necesarios para garantizar la seguridad ocupacional en el proyecto.
- Cámara fotográfica para llevar un registro de las fallas más comunes.
- Manual de Deterioros, para despejar alguna duda en el campo.
- Sistema de Posicionamiento Global (GPS).
- Pintura o tiza para marcar la carretera.

Además, el *Manual de Auscultación Vial del MOPT Guía para Profesionales* (2016) recomienda seguir el Decreto Ejecutivo N° 38799, *Reglamento de Dispositivos de Seguridad y Control Temporal de Tránsito para la Ejecución de Trabajos en las Vías*, y sus reformas, como parte de las medidas de seguridad pertinentes para la recolección de datos de cada vía en estudio. Una vez comprendido lo anterior, se procede a extraer la información de las unidades de muestreo a inspeccionar. Para ello, se necesitan hojas de levantamiento de deterioros específicas de la metodología del PCI.

Nivel de severidad y extensión del deterioro

Por otro lado, método PCI se basa en dos aspectos importantes para la medición de daños, que son los principales indicadores del cálculo del PCI: el nivel de severidad y la extensión del deterioro.

El nivel de severidad necesario para determinar la naturaleza del daño depende del enfoque técnico y de la perspectiva del operador del modelo. Por ello, se establecen tres niveles de severidad: alto, medio y bajo.

Además, la extensión del deterioro se mide según el tipo de daño. Dependiendo del tamaño del daño, se utilizan diferentes unidades de medida, como metro lineal, metro cuadrado o unidades específicas. Es importante tener en cuenta que cada tipo de deterioro requiere una medida adecuada para evitar malinterpretaciones.

Densidad de deterioro.

La densidad en la metodología del PCI se calcula de la siguiente manera:

$$Densidad = \frac{Extensión * 100}{Área UM}$$

Valor Deducido (VD)

Cada tipo de deterioro posee una gráfica que generalmente incluye tres curvas para representar su grado de severidad (A, B y C). El Valor Deducido varía según cada curva de severidad y se representa en el eje vertical (Eje Y), mientras que el porcentaje de Densidad de Deterioro se ubica en el eje horizontal (Eje X). El proceso consiste en encontrar en el Eje X el porcentaje correspondiente al deterioro de densidad y desplazarse hacia arriba hasta llegar a la curva de severidad correcta. A continuación, se traza una línea horizontal desde esta intersección hasta el eje vertical, lo que representa el valor del VD.

Número de Deduciones Admisibles (m)

Este valor se calcula a partir de todos los valores deducidos de cada deterioro según su nivel de severidad. Para ello, se busca el máximo valor deducido (MaxVD) y se aplica la siguiente fórmula:

$$m = 1 + \frac{9}{98} (100 - Max VD)$$

Para determinar los VD por evaluar se utiliza el cálculo de m. Si el número de VD es menor a m, se seleccionan todos los VD. Sin embargo, si hay más VD disponibles, se ordenan de forma descendente y se escogen únicamente m VD.

Máximo VD Corregido (VDC Máx)

Cuando se determina el valor de m, se establece que q es la cantidad de VD que superan el número 2. Sin embargo, con el fin de determinar el máximo VDC, es necesario sumar todos los VD y analizarlo en el gráfico de VDC corregido, siguiendo el mismo proceso utilizado en los gráficos de deterioro. Finalmente, es necesario disminuir a 2 el valor más pequeño de VD que sea mayor que 2, y continuar con este proceso hasta que q alcance el valor de 1.

Cálculo de PCI

Este cálculo es sumamente sencillo, puesto que ya se tienen los demás valores. La ecuación es la siguiente:

$$PCI_{um} = 100 - (VDC_{max})$$

Y, para finalizar, se establece el valor de PCI de toda la ruta en estudio, con la siguiente ecuación:

$$PCI_s = \frac{N * \Sigma^n (PCI_i * A_i)}{\Sigma^n (A_i)}$$

Básicamente, es la división de la sumatoria de la multiplicación de los valores de PCI por su área de UM, entre la sumatoria de todas las áreas de UM. Una vez establecido dicho valor, se debe definir el estado del pavimento de la vía en estudio de acuerdo al siguiente rango de calificaciones:

Figura 5.

Escala de Evaluación de PCI. Fuente: Vargas (2018)



Este rango permite definir en qué estado se encuentra la vía según el PCI y su metodología establecida de acuerdo a la norma ASTM D6433, dando una calificación del 0 a 100 y su respectiva condición según el valor calculado.

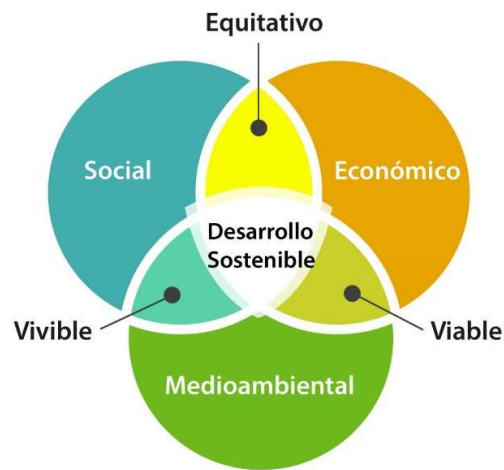
Metodología de Toma de Decisiones Multivariable (TDMV)

En los proyectos de infraestructura, tomar decisiones acertadas suele ser bastante difícil, especialmente cuando estas decisiones dependen de numerosas y diversas variables, cada una con sus propios criterios y características. Esta metodología permite considerar todas las variables y criterios necesarios para tomar la decisión más precisa en la evaluación de vías de comunicación.

El método TDMV sugiere una evaluación de la sostenibilidad, en la cual se deben examinar tres pilares fundamentales: el ámbito social, el económico y el medioambiental. Si se ignorara cualquiera de estos tres aspectos, el proyecto solo sería equitativo, viable o habitable, pero no sostenible.

Figura 6.

Pilares de la Sostenibilidad. Fuente: Evaluación de la sostenibilidad de carreteras.



Según Vergara Vera (2017), la Toma de Decisiones Multivariable (TDMV) es una metodología que permite examinar simultáneamente múltiples variables para entender las relaciones complejas que existen entre ellas. A diferencia del análisis univariado que estudia las variables por separado, la TDMV descubre patrones, correlaciones y dependencias entre múltiples dimensiones de datos.

Algunas de las principales técnicas utilizadas en TDMV incluyen:

- Análisis de componentes principales.
- Análisis factorial.
- Regresión múltiple.
- Análisis de conglomerados.
- Métodos de decisión multicriterio discretos como ponderación lineal, utilidad multiatributo, relaciones de sobreclasificación, y análisis jerárquico (AHP).

La TDMV es especialmente útil para analizar datos complejos y capturar interacciones que el análisis univariado podría pasar por alto. Algunos ejemplos de aplicación incluyen:

- Segmentación de mercado para entender grupos de consumidores según múltiples variables.
- Evaluación de riesgos en finanzas considerando diversos factores.
- Selección de proveedores en logística basada en criterios como calidad, precio y tiempo de entrega.
- Planificación estratégica en negocios analizando fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas.

En resumen, la Toma de Decisiones Multivariable es una metodología estadística avanzada que permite a las organizaciones tomar decisiones más informadas al considerar simultáneamente múltiples variables interrelacionadas. Su aplicación es clave en diversos campos para descubrir *insights* valiosos en conjuntos de datos complejos.

Dado que el enfoque de este estudio es comparativo, el MIVES resulta ser el instrumento adecuado para llevar a cabo esta evaluación, ya que permite analizar el valor ecológico de manera integral. Hasta ahora, las autoridades responsables de los proyectos en Costa Rica no han utilizado este tipo de herramientas y estudios para abordar los problemas asociados con la construcción de estos proyectos .

Planes de Mantenimiento Vial mediante el Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles (MIVES)

Los diversos criterios considerados permiten tomar decisiones informadas y precisas sobre aspectos importantes como el momento y la cantidad de inversión, el impacto ambiental de la inversión y el efecto social en los beneficiarios. El MIVES,

como herramienta, facilita este análisis multicriterio para la toma de decisiones priorizadas, que es el objetivo central de esta investigación.

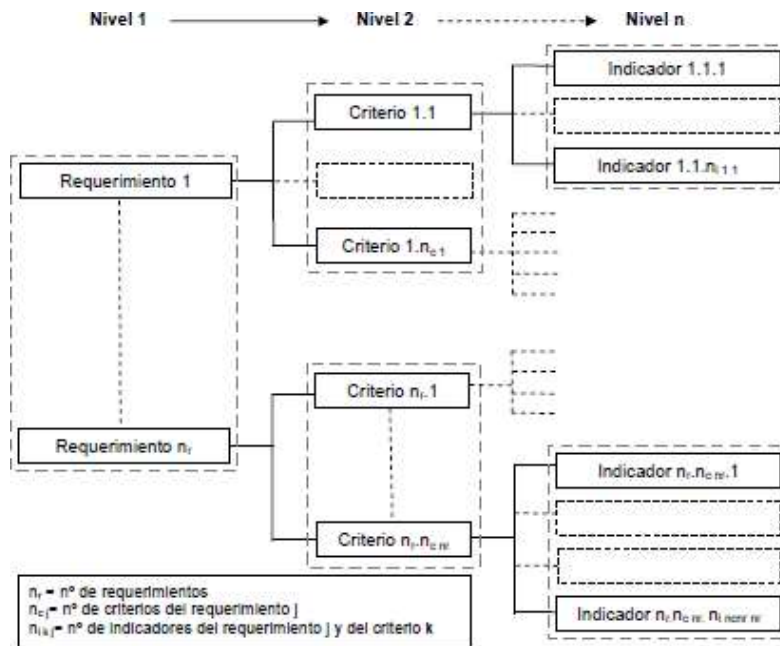
El MIVES se basa en la metodología de Toma de Decisiones Multivariable (TDMV) y se puede aplicar a diversos tipos de proyectos; en este caso específico, a un proyecto de infraestructura vial. Por ello, se ha decidido utilizar la herramienta MIVES para simplificar el análisis simultáneo de diversas variables.

Es esencial comprender el funcionamiento de su entorno y sus módulos para alcanzar el objetivo planteado. El *software* se compone de tres ejes principales para la toma de decisiones en la investigación: Requerimientos, Componentes y Ciclo de Vida. Los Requerimientos definen las características generales necesarias para realizar el análisis y tomar la mejor decisión, los Componentes describen los elementos de las opciones a evaluar y el Ciclo de Vida muestra las etapas del proyecto a lo largo del tiempo.

Para esta investigación, se utilizará únicamente el eje de Requerimientos o Árbol de Requerimientos, ya que los otros no forman parte del análisis.

Árbol de Requerimientos:

El Árbol de Requerimientos, o Árbol de Decisión, es el esquema que describe los niveles de jerarquía en el análisis: requerimientos, criterios e indicadores. Cada nivel debe tener un subnivel relevante para la investigación; de lo contrario, no tendría sentido evaluarlo.

Figura 7.*Árbol de Decisión Genérico del MIVES*

Fuente: Manual MIVES (2009)

Funciones de Valor:

Para establecer los indicadores, es crucial que sean cuantificables para determinar sus propiedades y definir la función que mejor los representa, permitiendo comparar las magnitudes de cada alternativa. Las funciones se representan mediante gráficas. En el eje Y, los valores van de 0 a 1 (de 0% a 100%), indicando el nivel de satisfacción del indicador. En el eje X, el usuario define los valores según la medición del indicador. El Manual MIVES (2009) recomienda:

- Determinar si la función es creciente o decreciente.
- Definir los puntos de máxima (X_{max}) y mínima (X_{min}) satisfacción, basándose en normativas vigentes, criterios de expertos o comparaciones entre alternativas.
- Identificar la forma de la función: lineal, cóncava, convexa o en forma de "S".

- Conocer la expresión matemática de la función de valor, si se requiere, para ingresarla en la herramienta.

Figura 8.

Expresión Matemática General de la Función de Valor

$$V_{ind} = B * \left[1 - e^{-K_i * \left(\frac{|X - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]$$

$$B = \left[1 - e^{-k_i * \left(\frac{|X_{max} - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]^{-1}$$

Cada variable representa lo siguiente:

Xmin = Es el valor en abscisas, cuya valoración es igual a cero (en el caso de funciones de valor crecientes).

X = Es la abscisa del indicador evaluado (variable de cada alternativa).

Pi = Es un factor que define si la curva es cóncava, convexa, lineal o con forma de “S”.

Ci = Se aproxima a la abscisa del punto de inflexión.

Ki = Se aproxima a la ordenada del punto de inflexión.

B = Es el factor que permite que la función se mantenga en el rango de valor de 0 a 1.

Xmax = Abscisa del indicador que genera un valor igual a 1.

Pesos:

En los análisis multivariable, es esencial determinar la importancia de cada variable, asignando pesos que reflejen su relevancia según el criterio de los usuarios.

Estos pesos se distribuyen de manera que el total en cada nivel (Requerimientos,

Criterios e Indicadores) sume 100%.

La herramienta MIVES ofrece dos métodos para asignar pesos:

- Método Directo: Asigna un porcentaje relativo a cada apartado sin cálculos previos, aunque es poco común debido a la necesidad de conocer claramente cada puntuación.
- Método de Proporciones: Compara la importancia de cada apartado utilizando un valor de referencia, facilitando la asignación de pesos cuando hay valores comparables. Si no hay valores de referencia, se puede usar un método alternativo.

El método alternativo en el software MIVES es:

- Proceso Analítico Jerárquico (AHP): Utiliza una escala de comparación propuesta por Saaty en 1980, asignando pesos según la importancia relativa de cada aspecto mediante una matriz de decisión, cuya escala consiste en asignar pesos según el grado de importancia que el usuario haya decidido darle a ese aspecto en función de otro del mismo nivel.

Figura 9.

Escala de Comparación de Saaty

VALOR	DEFINICIÓN	COMENTARIOS
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

Fuente: Manual MIVES (2009)

Herramienta MIVES:

Después de entender los principios de la metodología, se procede a revisar los módulos de MIVES y cómo se interrelacionan para transmitir la información del análisis:

- **Módulo Programador:** Genera los filtros de decisión y establece las condiciones de evaluación del proyecto sin conocer los resultados finales. El archivo creado se guarda en formato .mip para ser exportado al siguiente módulo.
- **Módulo Usuario:** Determina la cantidad de alternativas a evaluar, ingresando los valores de los indicadores obtenidos. El archivo final se guarda con la extensión .miu.
- **Módulo Reporte:** Genera los reportes basados en la evaluación realizada. Permite seleccionar tipos de gráficos, alternativas y niveles del árbol de decisión para comparar. Requiere un análisis detallado para comprender las razones detrás de los resultados obtenidos.

Ubicación geográfica del Área de Estudio

Esta investigación se localiza en el cantón de Tibás, provincia de San José, Costa Rica. El cantón Tibás se considera 100% urbano y es un área de gran afluencia vehicular, ya que conecta los cantones de San José, Moravia, Santo Domingo y Goicoechea. Debido a su función de conexión entre estos cantones, presenta un alto tránsito, especialmente en la ruta que pasa por la comunidad de La Florida.

Como el análisis considera la red vial cantonal, se utilizarán como puntos iniciales el punto A y el punto B, y como punto final el punto C; determinados de la siguiente manera:

- Punto A: San Juan de Tibás (Parque Central del cantón).
- Punto B: Anselmo de Llorente (Escuela de Llorente).
- Punto C: La Comunidad de la Florida.

Figura 10.

Mapa de Ruta de Estudio en la comunidad de La Florida de Tibás.



Nota. Fuente: Google Maps

Para el estudio comparativo, se han escogido las tres rutas más usadas por sus vecinos y otros beneficiarios que utilizan dichas vías, como se muestra en la figura 7. A continuación, se describe cada una de las rutas seleccionadas:

Ruta 1.

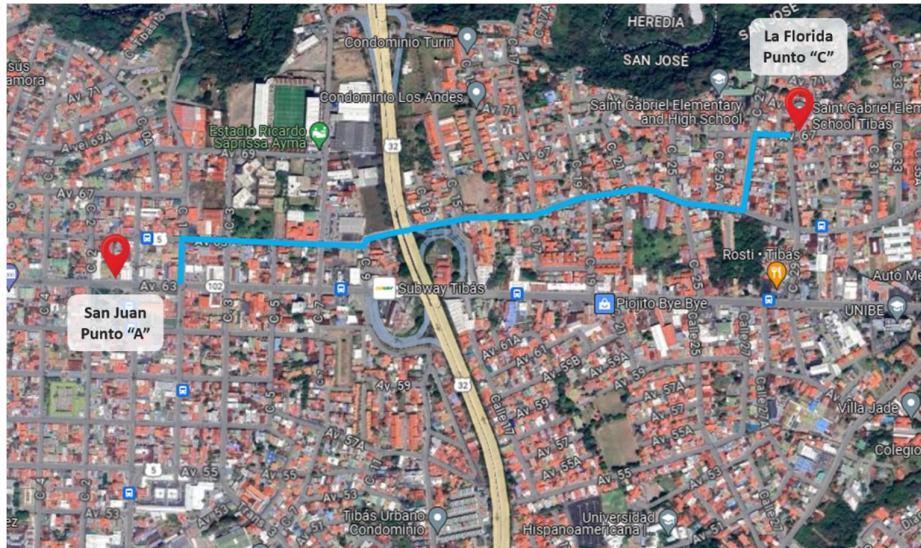
Inicia en la esquina noreste del Parque de la Democracia (Parque Central del cantón) y recorre aproximadamente 1.40 km hacia el este (Ruta 102) hasta llegar al cruce con la Travesía 102-26 (Calle 29). Luego, continúa 600 m hacia el norte, terminando frente a la Pulpería Santa Rita (Avenida 67).

Figura 11.*Mapa de Ruta 1.*

Nota. Fuente: Google Maps

Ruta 2.

Inicia en la esquina noreste del Parque de la Democracia (Parque Central del cantón) y recorre aproximadamente 100 m hacia el este (Ruta 102) hasta llegar al cruce con la Travesía 102-5 (Calle 5). Luego, continúa 100 m hacia el norte hasta el cruce con la Travesía 5-65 (Avenida 65), donde recorre 1.20 km hacia el oeste hasta llegar a la Panadería La Florida. A partir de ahí, avanza 200 m hacia el norte (Calle 27) hasta el estudio fotográfico Carlos Céspedes, y finalmente recorre 100 m hacia el este hasta terminar frente a la Pulpería Santa Rita (Avenida 67).

Figura 12.*Mapa de Ruta 2.*

Nota. Fuente: Google Maps

Ruta 3.

Inicia frente a la Escuela Monseñor Anselmo Llorente y Lafuente, recorre aproximadamente 1.20 km hacia el noreste (Ruta 101) hasta llegar al cruce con la Travesía 101-117 (Ruta 117). Luego, continúa 300 m hacia el norte hasta el cruce con la Travesía 117-65 (Avenida 65), donde recorre 300 m hacia el suroeste hasta llegar al Gimnasio de la Unidad Pedagógica José Rafael Araya Rojas. A partir de ahí, avanza 200 m hacia el norte (Calle 31) y finalmente recorre 100 m hacia el oeste hasta terminar frente a la Pulpería Santa Rita (Avenida 67).

Figura 13.*Mapa de Ruta 3.*

Nota. Fuente: Google Maps

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Enfoque de la investigación

En el marco de esta investigación, se ha adoptado un enfoque mixto, ya que se trata de una iniciativa de infraestructura vial que requiere el análisis de diversas variables. Estas incluyen el nivel de severidad y extensión de los deterioros, los valores obtenidos a partir de gráficos, el cálculo del PCI y otros cálculos numéricos apoyados en ecuaciones.

Además, el proyecto implica un trabajo de campo exhaustivo para la recopilación de datos físicos presentes en las vías. Asimismo, se realiza una evaluación para desarrollar una propuesta de plan de mantenimiento, lo cual permite analizar variables ambientales, como la huella de carbono, y factores sociales, como el tiempo de recorrido de cada ruta, aspectos que impactan directamente en los beneficiarios y su calidad de vida. Por consiguiente, esta investigación integra enfoques tanto cuantitativos como cualitativos, conformando así una metodología mixta.

Método de la Investigación

Esta investigación se caracteriza como cuantitativa experimental, ya que, a través del trabajo de campo, se identifican los deterioros de cada ruta, lo que permite generar un indicador (PCI). A partir de esto, se realiza un análisis que culmina en una propuesta de plan de mantenimiento. Además, se consideran diversas variables de sostenibilidad para evaluar comparativamente las vías seleccionadas, empleando el Método de Toma de Decisiones Multivariantes (TDMV) mediante la herramienta informática MIVES. Este método determina la opción más sostenible al analizar las variables de sostenibilidad para obtener el resultado deseado.

Fuentes de información

Las fuentes de esta investigación incluyen los datos obtenidos mediante los instrumentos aplicados, tales como la norma que fundamenta la metodología del PCI: *ASTM (2004): Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en caminos y estacionamientos (ASTM D6433)*. Esta norma se complementa con el *Manual de Auscultación Vial del MOPT: Guía para Profesionales (2016)*, que contiene información valiosa, como el *Catálogo de Deterioros*, que clasifica y tipifica los deterioros más comunes en pavimentos flexibles.

El trabajo integra la metodología TDMV, basada en el **Manual MIVES (2009)**, que no solo detalla sus principios, sino que también recomienda la herramienta MIVES para simplificar el proceso mediante sus componentes, funciones y el árbol de requerimientos.

Población

Los sujetos de información son:

- Conductores.
- Peatones.
- Ciclistas.

Muestra

Los muestreos no probabilísticos presentan debilidades teóricas. Sin embargo, hay varias formas de muestreo no probabilístico que son muy utilizadas en la práctica (Hernández, 2012, pp. 21-22). Tomando en cuenta el nivel de complejidad de la investigación, se usarán los siguientes tipos de muestreo:

- Muestreo de conveniencia: Se seleccionan los elementos de la muestra entre los que están más disponibles o que resultan más convenientes para el investigador

(menor costo, tiempo, entre otros). Se debe recordar que estas muestras están sujetas al sesgo de selección, por lo que es arriesgado utilizar los resultados para realizar inferencias a las poblaciones de interés. Este muestreo contó con 711 sujetos.

- Muestreo de juicio, de experto o intencional: Tal como indica su nombre, la muestra es seleccionada por un experto, es decir, una persona con experiencia y conocimiento de la población de estudio en grado tal que le permitiría obtener una muestra representativa de la población. Este muestreo contó con 2 expertos: un empleado de la municipalidad y un ingeniero civil, ambos con calidad de anonimato.

Instrumentos

Se obtuvieron los datos sobre el deterioro utilizando el *Catálogo de Deterioros del MOPT* y mediante una inspección visual realizada por el investigador, siguiendo la metodología del PCI y su normativa correspondiente.

Para registrar los deterioros por UM, se empleó una hoja de levantamiento de deterioros, adaptada de la *Hoja de Levantamiento de Deterioros del Manual de Auscultación Vial del MOPT: Guía para Profesionales* (2016), la cual se fundamenta en la metodología del PCI para la evaluación de carreteras de pavimento flexible. Se realizaron algunas modificaciones en la estructura y en la información requerida para la inspección, realizadas por el propio investigador e inspector. A continuación, se presenta la hoja utilizada:

Figura 14.

Hoja de Levantamiento de Deterioros

Hoja de Inspección del Paviment Condition Index (PCI)

Fecha: _____ Estacion Inicial: _____ Desviación estándar (σ): _____ Ancho de vía: _____
 Ruta Estudio: _____ Estacion Final: _____ Error Admisible (e): _____ Longitud UM (m): _____
 Número UM: _____ Área UM (m²): _____

Clasificación de Deterioros de Pavimentos Flexibles	Severidad			Alto			Medio			Bajo		
	Alto	Medio	Bajo	Extension (m)	% Densidad	Valor Deducido	Extension (m)	% Densidad	Valor Deducido	Extension (m)	% Densidad	Valor Deducido
Categoría 1: Grietas	1.1 Cuero de Lagarto											
	1.2 Grieta Longitudinal											
	1.3 Reflejo de Juntas											
	1.4 Grietas en Bloque											
	1.5 Grietas de Borde											
	1.6 Grietas en Arco											
Categoría 2: Deformaciones	2.1 Roderas o Ahuellamiento											
	2.2 Abultamiento y Hundimiento											
	2.3 Corrugación											
	2.4 Depresión											
	2.5 Hinchamiento											
	2.6 Desplazamiento											
Categoría 3: Textura Superficial	3.1 Exudación											
	3.2 Pulimiento de Agregados											
	3.3 Desprendimiento de Agregados											
	3.4 Desgaste Superficial											
Categoría 4: Misceláneos	4.1 Escalonamiento Calzada-Espaldón											
	4.2 Bache											
	4.3 Hueco											
	4.4 Cruce de Línea Férrea											

Nota. Elaboración propia Murillo (2024).

Para la recolección de datos necesarios en la metodología de Toma de Decisiones Multivariables se utilizaron varios instrumentos, los cuales se describen a continuación:

- Datos de sujetos: Se utilizará una encuesta como técnica de investigación. Según Hernández (2012), la encuesta es una de las mejores técnicas para recolectar información puntual de personas respecto a ciertas características de un objeto en común. Por lo general, las personas se sienten cómodas con el uso de encuestas, las cuales son ampliamente utilizadas en investigaciones con enfoque cuantitativo o mixto, e incluso como complemento en investigaciones con

enfoque cualitativo. Para el caso de esta investigación, se diseñará un cuestionario cerrado de 10 preguntas.

- **Mediciones:** Se emplearán herramientas especializadas para obtener datos precisos, que se registrarán en una hoja de cotejo. Esta hoja servirá como guía para evaluar el estado actual de la carretera.
- **Observación:** Hernández et al. (2010), con relación a la observación, plantean que “este método de recolección de datos consiste en el registro sistemático, válido y confiable de comportamientos y situaciones observables, a través de un conjunto de categorías y subcategorías” (p. 260).

Proceso para la recolección y análisis de datos

El procedimiento cuenta con 7 etapas, las cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 10.

El procedimiento por etapas de la investigación

Procedimiento de investigación por etapas

Etapa 1	Es la etapa donde se recoge la mayor cantidad de datos generales y opiniones de la comunidad.
Etapa 2	Definición de la metodología de toma de decisiones multivariable.
Etapa 3	Definición de metodología de PCI.
Etapa 4	Análisis de la condición de la carpeta asfáltica.
Etapa 5	En esta etapa se toman los datos de las etapas anteriores y se hace un análisis completo y detallado de los requerimientos que necesita propuesta.
Etapa 6	Se valida plan de mantenimiento para la carretera principal comunidad de la Florida de Tibás.

Etapa 7	En esta etapa tomando las recomendaciones anteriores se procede a diseñar una propuesta que permita el diseño y ejecución de un proyecto vial, Tomando en cuenta dos diseños un diseño pavimento flexible y un diseño pavimento rígido.
---------	---

Nota. Elaboración propia Murillo (2024).

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Estado del pavimento flexible mediante la Metodología del PCI

Como parte integral de cualquier metodología, se requiere un procedimiento sistemático y repetitivo. A continuación, se detalla el método para aplicar la metodología del Índice de Condición del Pavimento (PCI) en cada Unidad de Muestreo (UM) y en cada ruta seleccionada.

Unidad de Muestreo (UM):

Se debe determinar un promedio del ancho de la calzada y la longitud de la vía a evaluar. En el caso de la Ruta 2, el ancho de la calzada es de 6 metros y su longitud es de 1,700 metros. Con estos datos, se puede calcular la cantidad total de tramos o secciones a incluir en el análisis. Es importante señalar que este procedimiento se aplica a pavimentos flexibles, ya que la metodología varía según el tipo de pavimento.

Longitud de la UM:

Con el ancho de la calzada establecido en 6 metros (ver tabla 8), se determina una longitud de la UM de 38 metros. Esta elección se justifica al ser "a criterio del usuario" y se ajusta a los promedios documentados en la vía en cuestión.

Figura 15.

Selección de Longitud de UM. Fuente: Manual de Auscultación Vial del MOPT

Ancho de Calzada (m)	Longitud de UM (m)
3.5 - 6.5	47
4.0 - 7.5	42
4.5 - 8.5	38
5.0 - 9.0	35
5.5 - 10 Máx.	31

Número Total de UM (N):

Con la ecuación de N se deben alimentar los siguientes datos: longitud de proyecto es de 1,700 metros y la longitud de UM es de 38 metros, por lo que se calcula de la siguiente forma:

$$N = \frac{\text{Long. Proyecto}}{\text{Long. Um}} = \frac{1700 \text{ m}}{38 \text{ m}} = 45$$

La fórmula anterior determina que el valor de N para la Ruta 2 es de 45.

Número Mínimo de UM a Inspeccionar (n):

Dado que el proceso de evaluación puede resultar extremadamente laborioso y lento en términos prácticos, se opta por trabajar con una muestra aleatoria seleccionada mediante el cálculo de 'n', utilizando una desviación estándar de 10, considerando que se trata de pavimento flexible, y un margen de error aceptable del 5%. Así, el valor de 'n' se determina a través de la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\frac{e^2}{4} * (N - 1) + \sigma^2} = \frac{45 * 10^2}{\frac{5^2}{4} * (45 - 1) + 10^2} = 12$$

Sin embargo, con la intención de poder obtener una cantidad más representativa de UM por inspeccionar, se ha utilizado el criterio técnico expuesto en la Tabla 9:

Figura 16.

Selección de “n” bajo criterio técnico. Fuente: Manual de Auscultación Vial del MOPT

Unidad de muestra en la sección (N)	Número de Unidades a inspeccionar (n)
1 – 5	1
6 – 10	2
11 – 15	3
16 – 40	4
Más de 40 pero menos de 200	10% (redondear hacia arriba la próxima unidad de muestra)

Basado en lo expuesto en la tabla anterior, se determinó n es el 10% redondeado hacia el entero mayor del valor de N , siendo N igual a 45 y el nuevo valor de n es igual a 5 (una vez redondeado) para la ruta 2 en estudio.

Escogencia de UM a Inspeccionar:

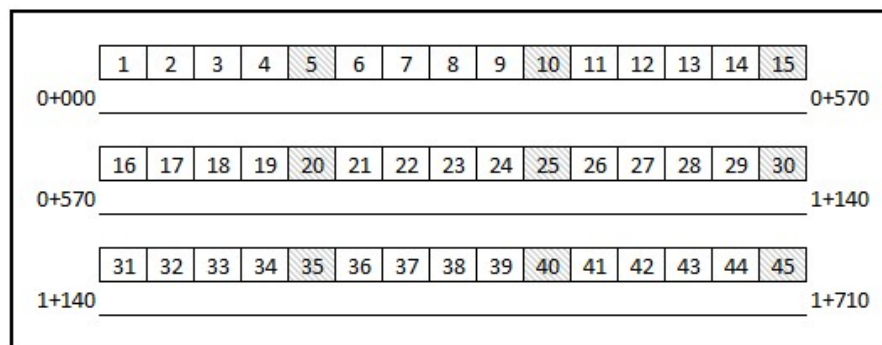
Mediante la utilización de la ecuación presentada en el marco teórico de este documento, se determina el intervalo de muestreo ' i ', el cual define la distancia entre cada Unidad de Muestreo (UM) que será objeto de inspección, como se ilustra a continuación:

$$i = \frac{N}{n} = \frac{45}{5} = 9$$

En lo que respecta al primer valor de n , denominado s , este se selecciona aleatoriamente de entre los números del 1 al 5, y se ha decidido usar el valor 5 para s . Por lo tanto, se muestran las UM a inspeccionar en la figura siguiente, donde las UM en sombreadas en gris indican las que deben ser inspeccionadas:

Figura 17

Unidades de muestreo y su selección aleatoria.



Fuente: Elaboración propia, Murillo (2024)

Con la totalidad de los valores establecidos para la Ruta 2, se presenta una tabla resumen que detalla las Unidades de Muestreo (UM) a inspeccionar, incluyendo sus

características más significativas y los requisitos necesarios para progresar en la implementación de la metodología PCI:

Tabla 11.

Unidades de Muestreo a inspeccionar

#	UM	Estación Inicial	Estación Final	Longitud UM (m)	Ruta	Detalle de Referencia
1	5	0+152	0+190	38	Calle 5	Costado Oeste de Grupo Mutual
2	10	0+342	0+380	38	Avenida 65	Desde Taller Autopia hasta Restaurante Pura Vida
3	15	0+532	0+570	38	Avenida 65	Desde Óptica Bermudez hasta Legacy Training Center
4	20	0+722	0+760	38	Avenida 65	Desde parte inferior de puente sobre Ruta 32 hasta Mundo Viajes CR
5	25	0+912	0+950	38	Avenida 65	Desde Costa Rica Expeditions hasta Soda Mei Asia
6	30	1+102	1+140	38	Avenida 65	Desde Apartamentos MyM Tibás hasta Súper Don Beto
7	35	1+292	1+330	38	Avenida 65	Desde Taller Sami hasta iglesia Ebenezer CR
8	40	1+482	1+520	38	Calle 27	Desde Panadería La Florida hasta Consultorio de Marco Sánchez
9	45	1+672	1+710	38	Avenida 67	Desde estudio fotográfico Carlos Céspedes hasta Pulpería Santa Rita

Fuente: Elaboración propia, Murillo (2024)

Tabulación de Deterioros y revisión en sitio

En esta etapa es crucial la correcta recolección y tabulación de los deterioros en la vía para evitar datos incorrectos que puedan llevar a resultados erróneos. También es fundamental comprender los conceptos de nivel de severidad y extensión del deterioro.

El nivel de severidad se clasifica en tres categorías: bajo, medio y alto, las cuales se determinan en función del estado del deterioro y del criterio de quien realiza el levantamiento. La extensión del deterioro se mide de acuerdo con la unidad de medida establecida en el catálogo de deterioros empleado.

Una vez configurado este formulario de registro, se seleccionará una UM aleatoria para representar los protocolos informáticos en la hoja hasta que se determine el Índice de Condición del Pavimento (PCI). Para ello se seleccionó el UM número 30 de la Ruta 2. Esto se debe a sus características representativas, lo que facilita la explicación del procedimiento. A continuación, se presentan el registro y la recolección de datos correspondientes a la UM 30 de la Ruta 2:

Figura 18

Hoja de Inspección de Deterioros de la UM 30 en la Ruta 2

Hoja de Inspección del Paviment Condition Index (PCI)													
Fecha: 5/4/2024		Estacion Inicial: 1+102		Desviación estándar (σ): 10			Ancho de vía: 6,00						
Ruta Estudio: 2		Estacion Final: 1+140		Error Admisible (e): 5%			Longitud UM (m): 38,00						
Número UM: 30							Área UM (m ²): 228,00						
Clasificación de Deterioros de Pavimentos Flexibles		Severidad			Alto			Medio			Bajo		
		Alto	Medio	Bajo	Extension (m)	% Densidad	Valor Deducido	Extension (m)	% Densidad	Valor Deducido	Extension (m)	% Densidad	Valor Deducido
Categoría 1: Grietas	1.1 Cuero de Lagarto	x	x		9,20	4,04	50	15,90	6,97	42			
	1.2 Grieta Longitudinal												
	1.3 Reflejo de Juntas												
	1.4 Grietas en Bloque												
	1.5 Grietas de Borde												
	1.6 Grietas en Arco												
Categoría 2: Deformaciones	2.1 Roderas o Ahuellamiento												
	2.2 Abultamiento y Hundimiento												
	2.3 Corrugación												
	2.4 Depresión												
	2.5 Hinchamiento												
	2.6 Desplazamiento												
Categoría 3: Textura Superficial	3.1 Exudación												
	3.2 Pulimiento de Agregados												
	3.3 Desprendimiento de Agregados	x			6,70	2,94	7						
	3.4 Desgaste Superficial												
Categoría 4: Misceláneos	4.1 Escalonamiento Calzada-Espaldón												
	4.2 Bache		x	x				8,50	3,73	18	4,50	1,97	5
	4.3 Hueco												
	4.4 Cruce de Línea Férrea												

Fuente: Elaboración propia Murillo (2024)

Para la sección de estudio (representada en la figura 15), se detectó la presencia de cinco deterioros distintos, los cuales forman parte de tres de las cuatro categorías de deterioros. Cada uno de ellos fue identificado y categorizado según corresponde. Posteriormente, con ayuda de un odómetro manual y otros instrumentos, se realizó la medición de la extensión (m) para cada uno de ellos.

Densidad del Deterioro

Este valor está medido como un porcentaje (%), en función de la extensión del deterioro (m) y el área de UM (m²) según fórmula dada en el marco teórico de este documento. Para ejemplificarlo, se utilizarán los valores del deterioro 1.1 Cuero de Lagarto con nivel de severidad alta:

$$Densidad = \frac{Extensión * 100}{Área UM} = \frac{9,20 * 100}{228} = 4,04$$

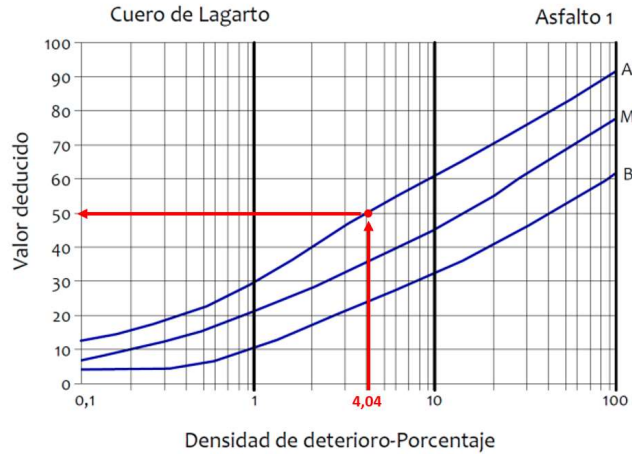
De esta misma manera, se realizó el cálculo del porcentaje de densidad para cada uno de los otros cuatro deterioros detallados en el paso anterior.

Valor Deducido (VD)

En el Apéndice 4 del Manual de Auscultación del MOPT. Guía para Profesionales (2016) se cuentan con una serie de gráficas para determinar el valor deducido (VD) mediante el porcentaje de densidad de deterioro. Así, se continúa calculando los valores deducidos asociados a cada deterioro. Por ejemplo, para el primer valor del 4,04% evaluado con un nivel de severidad alto en la gráfica de cuero de lagarto, se determina que el valor deducido es 50, tal como se muestra a continuación:

Figura 19

Gráfica para el Cálculo de los Valores Deducidos del Deterioro Cuero de Lagarto en el Asfalto.



Fuente: Apéndice 4, Manual de Auscultación del MOPT. Guía para Profesionales (2016)

Número de Deduciones Admisibles (m)

El valor m determina cuáles deducciones deben considerarse en el cálculo final del Índice de Condición de Pavimento (PCI). Este valor sirve para filtrar los VD no relevantes dentro de la muestra. Una vez obtenidos todos los VD, se ordenan de mayor a menor para seleccionar el Máximo VD (MaxVD), que representa el valor individual más alto de VD para esa Unidad de Muestreo (UM). De acuerdo a la figura 15, el valor de VD más alto es de 50, el cual se evaluará utilizando la siguiente fórmula:

$$m = 1 + \frac{9}{98} (100 - \text{Max VD}) = 1 + \frac{9}{98} (100 - 50) = 5,60$$

Máximo VD Corregido (VDC Máx)

Dado que m es mayor que el número de VD, se utilizan todos los VD para el cálculo del VD Corregido (VDC). Por tanto, el VDC Máx se determina mediante el proceso iterativo descrito en el marco teórico de la presente investigación:

Figura 20

Ejemplo Cálculo VDC Máx

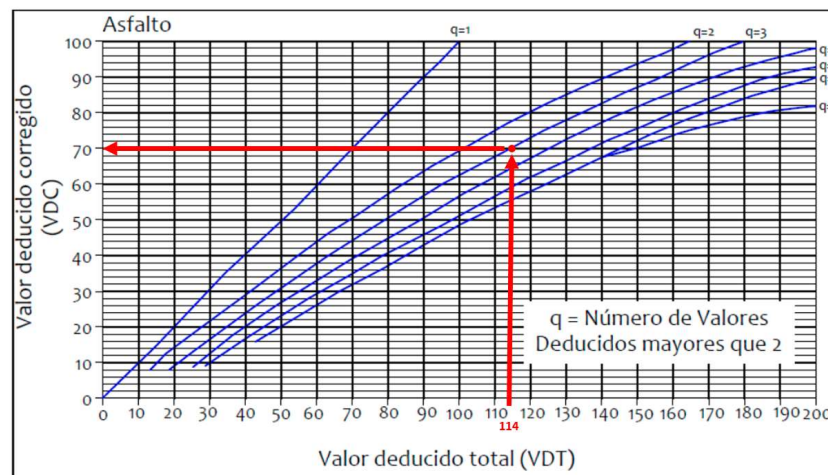
Valor Deducido (obtenidos tabla)			Max VD: 50 m: 5,6	Ejemplo Cálculo VDC Máx					VDT 1: 122 → q: 5 VDT 2: 119 → q: 4 VDT 3: 114 → q: 3 VDT 4: 98 → q: 2 VDT 5: 58 → q: 1	
1.1	Alto	50		VDC 1	VDC 2	VDC 3	VDC 4	VDC 5		
1.1	Medio	42		50	50	50	50	50		2
4.2	Medio	18		42	42	42	42	2		2
3.3	Alto	7		18	18	18	2	2		2
4.2	Bajo	5		7	7	2	2	2		2
			5	2	2	2	2	2		
			122	119	114	98	58			

Fuente: Elaboración propia Murillo (2024)

Como se ilustra en la figura anterior, se realiza la sumatoria para calcular los Valores Deducidos Totales (VDT) y corregir los VD. A cada VD se le asigna un valor en la curva para su corrección, siguiendo el procedimiento descrito:

Figura 21

Ejemplo de aproximación de VDC.



Fuente: Apéndice 4, Manual de Auscultación del MOPT. Guía para Profesionales

(2016)

Continuando con el ejemplo, si se utiliza un VDT de 114, aplicado en la curva de $q=5$, el VDC correspondiente es 70. Este proceso se repite para los demás VD para

obtener su VDC respectivo. Finalmente, se selecciona el VDC 2 como el VDC Máx, ya que es el valor más alto de todos los VDC para esa UM.

Figura 22

Ejemplo Cálculo VDC Máx.

VDT	Valor q	VDC		
1	122	5	63	VDC Máx: 77
2	119	4	77	
3	114	3	70	
4	98	2	68	
5	58	1	58	

Fuente: Elaboración propia Murillo (2024)

Cálculo de PCI para la UM

Con un VDC Máx representado por VDC2, que tiene un valor equivalente a 77, se procede a calcular el PCI para la UM 30 de la ruta 2 mediante la siguiente fórmula:

$$PCI_{um} = 100 - (VDC_{max}) = 100 - (77) = 23$$

Según la escala de calificaciones, esta UM recibe una calificación de "Muy Malo".

85-100		Excelente
70-84		Muy Bueno
55-69		Bueno
40-54		Regular
25-39		Malo
10-24		Muy Malo
0-9		Fallado

El mismo procedimiento se aplica a las otras 8 UMs para determinar el PCI total de la vía en estudio. Tal como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 12.*Ejemplo de cálculo de PCI para la Ruta 2*

#	UM	Estación Inicial	Estación Final	Longitud UM (m)	Ruta	PCI	Estado	PCI x Área UM*
1	5	0+152	0+190	38	Calle 5	87	Excelente	19.836
2	10	0+342	0+380	38	Av. 65	49	Regular	11.172
3	15	0+532	0+570	38	Av. 65	74	Muy Bueno	16.872
4	20	0+722	0+760	38	Av. 65	55	Bueno	12.540
5	25	0+912	0+950	38	Av. 65	42	Regular	9.576
6	30	1+102	1+140	38	Av. 65	23	Muy malo	5.244
7	35	1+292	1+330	38	Av. 65	32	Malo	7.296
8	40	1+482	1+520	38	Calle 27	51	Regular	11.628
9	45	1+672	1+710	38	Av. 67	37	Malo	8.436

*Área de UM = 228 m²*Fuente: Elaboración propia, Murillo (2024)*

Posteriormente se calcula el PCI de la ruta 2 según la siguiente ecuación:

$$PCI_s = \frac{\sum^n (PCI_i * A_i)}{\sum^n (A_i)} = \frac{102.600}{(228 * 9)} = 50$$

Por tanto, la aplicación de la metodología PCI para la ruta 2 indica que su estado es regular, ya que el valor de su PCI es de 50.

Evaluación de PCI para la Ruta 1:

Para la Ruta 1 se obtuvieron los siguientes parámetros:

Tabla 13.*Cálculo de PCI para Ruta 1*

#	UM	Estación Inicial	Estación Final	Longitud UM (m)	Ruta	PCI	Estado	PCI x Área UM*
1	6	0+190	0+228	38	Ruta 102	83	Muy Bueno	18.924

2	12	0+418	0+456	38	Ruta 102	87	Excelente	19.836
3	18	0+646	0+684	38	Ruta 102	74	Muy Bueno	16.872
4	24	0+874	0+912	38	Ruta 102	68	Bueno	15.504
5	30	1+102	1+140	38	Ruta 102	70	Muy Bueno	15.960
6	36	1+330	1+368	38	Ruta 102	62	Bueno	14.136
7	42	1+558	1+596	38	Calle 29	36	Malo	8.208
8	48	1+786	1+824	38	Calle 29	43	Regular	9.804
9	53	1+976	2+014	38	Calle 29	51	Regular	11.628

*Área de UM = 228 m² PCI de Ruta 1: **64** Estado: **Bueno**

Por lo tanto, el estado del pavimento en la ruta 1 se clasifica como "Bueno", con un Índice de Condición de Pavimento (PCI) ponderado de 64. A pesar de que el pavimento se encuentra en un estado relativamente aceptable, es necesario realizar mantenimientos preventivos para evitar el deterioro de la ruta a un nivel inferior. Si no se toman medidas oportunas, podrían ser necesarios tratamientos muy costosos para su rehabilitación.

Evaluación de PCI para la Ruta 2:

Para la ruta 2 se obtuvieron los siguientes parámetros:

Tabla 14.

Cálculo de PCI para Ruta 2

#	UM	Estación Inicial	Estación Final	Longitud UM (m)	Ruta	PCI	Estado	PCI x Área UM*
1	5	0+152	0+190	38	Calle 5	87	Excelente	19.836
2	10	0+342	0+380	38	Av. 65	49	Regular	11.172
3	15	0+532	0+570	38	Av. 65	74	Muy Bueno	16.872
4	20	0+722	0+760	38	Av. 65	55	Bueno	12.540
5	25	0+912	0+950	38	Av. 65	42	Regular	9.576
6	30	1+102	1+140	38	Av. 65	23	Muy malo	5.244

7	35	1+292	1+330	38	Av. 65	32	Malo	7.296
8	40	1+482	1+520	38	Calle 27	51	Regular	11.628
9	45	1+672	1+710	38	Av. 67	37	Malo	8.436

*Área de UM = 228 m²

PCI de Ruta 1: **50**

Estado: **Regular**

La condición del pavimento en la ruta 2 se clasifica como "Regular", con un PCI promedio de 50. Sin embargo, se encuentra cercana a la penúltima categoría de "Malo", lo que implica una alta inversión para su mejora, dado el estado crítico del pavimento.

Evaluación de PCI para la Ruta 3:

Para la ruta 3 se obtuvieron los siguientes parámetros:

Tabla 15.

Cálculo de PCI para Ruta 3

#	UM	Estación Inicial	Estación Final	Longitud UM (m)	Ruta	PCI	Estado	PCI x Área UM*
1	6	0+190	0+228	38	Ruta 101	63	Bueno	14.364
2	12	0+418	0+456	38	Ruta 101	72	Muy Bueno	16.416
3	18	0+646	0+684	38	Ruta 101	76	Muy Bueno	17.328
4	24	0+874	0+912	38	Ruta 101	53	Regular	12.084
5	30	1+102	1+140	38	Ruta 101	68	Bueno	15.504
6	36	1+330	1+368	38	Ruta 117	23	Muy Malo	5.244
7	42	1+558	1+596	38	Av. 65	36	Malo	8.208
8	48	1+786	1+824	38	Calle 31	47	Regular	10.716
9	54	2+014	2+052	38	Av. 67	50	Regular	11.400

*Área de UM = 228 m²

PCI de Ruta 1: **54**

Estado: **Regular**

De manera similar a la ruta analizada anteriormente, el PCI promedio de la Ruta 3 es de 54, lo cual está muy cerca de las categorías que indican una condición aún más deteriorada del pavimento. Esto sugiere que se requerirá una inversión considerable para restaurar la vía a un estado adecuado.

Planes de Mantenimiento Vial de las rutas de acceso

Como réplica a las condiciones del pavimento en las vías analizadas, se ha desarrollado una propuesta de intervención y mejora para cada ruta, alineada con sus necesidades específicas. El plan de mantenimiento abarca un período de 12 años, comenzando en 2025 (año uno) y concluyendo en 2035 (año doce), con intervenciones rutinarias programadas cada cuatro años hasta completar el proceso de rehabilitación vial.

El plan general incluye la identificación de los deterioros presentes y su extensión a lo largo de cada ruta, así como la propuesta de actividades de mantenimiento específicas para cada tipo de deterioro. Estas propuestas se basan en el Catálogo de Deterioros del Manual de Auscultación del MOPT. Guía para Profesionales (2016) y en el sustento teórico de esta investigación. Los costos se han estimado con base en los trabajos de Peshkin et al. (2011) y Vargas (2018).

Figura 23

Costos Estimados para Tratamientos en Pavimentos MAC.

Table 2.13. Estimated Treatment Costs for Preservation Treatments on HMA-Surfaced Pavements

Treatment	Relative Cost (\$ to \$\$\$\$)	Estimated Unit Cost
Crack filling	\$	\$0.10 to \$1.20/ft
Crack sealing	\$	\$0.75 to \$1.50/ft
Slurry seal	\$\$	\$0.75 to \$1.00/yd ²
Microsurfacing (single-course)	\$\$	\$1.50 to \$3.00/yd ²
Chip seal (single-course)	\$\$ (conventional) \$\$\$ (polymer modified)	\$1.50 to \$2.00/yd ² (conventional) \$2.00 to \$4.00/yd ² (polymer modified)
Ultra-thin bonded wearing course	\$\$\$	\$4.00 to \$6.00/yd ²
Thin HMA overlay (dense graded)	\$\$\$	\$3.00 to \$6.00/yd ²
Cold milling and thin HMA overlay	\$\$\$	\$5.00 to \$10.00/yd ²
Ultra-thin HMA overlay	\$	\$2.00 to \$3.00/yd ²
Hot in-place recycling (excluding thin HMA overlay for surface recycle and remixing types)	\$\$/\$\$\$	\$2.00 to \$7.00/yd ²
Cold in-place recycling (excluding thin HMA overlay)	\$\$	\$1.25 to \$3.00/yd ²
Profile milling	\$	\$0.35 to \$0.75/yd ²
Ultra-thin whitetopping	\$\$\$\$	\$15.00 to \$25.00/yd ²

Note: \$ = low cost; \$\$ = moderate cost; \$\$\$ = high cost; \$\$\$\$ = very high cost.

Fuente: Peshkin, (2011).

Sin embargo, dado que estos documentos tienen cierto nivel de antigüedad, se ha incorporado un factor de corrección. Este factor ajusta los costos a una tasa de 1.20 veces el valor sugerido por Vargas (2018) y la guía de 2011, como se detalla en la tabla siguiente.

Tabla 16

Determinación de costo para mantenimiento

Detalle de Mantenimiento	Unidad de Medida	Vida Útil del Mantenimiento	Costo Unitario \$ USD (2018)	Costo Unitario \$ USD (2025)
Sellado de Grietas	m.l.	2 a 4 años	0.69	0.83
Sellado de Viruta	m ²	3 a 7 años	2.51	3.01
Sellado Tipo Lechada	m.l.	3 a 5 años	0.46	0.55
Sobre capa delgada de MAC	m ²	5 a 12 años	7.53	9.04
Reciclado en frío en sitio / Bacheo	m ²	6 a 8 años	3.76	4.51
Reciclado en caliente en sitio	m ²	6 a 10 años	8.78	10.54
Reconstrucción	m ²	N/A	31.35	37.62

Fuente: Elaboración propia, Murillo (2024)

Se han definido previamente las tareas de mantenimiento según el tipo de deterioro, y en la tabla anterior se describe la vida útil de cada actividad, respaldada por la figura siguiente.

Figura 24

Vida Útil de las Tareas de Mantenimiento Propuestas

Table 2.11. Expected Performance of Preservation Treatments Applied to HMA-Surfaced Pavements

Treatment	Expected Performance	
	Treatment Life (yr)	Pavement Life Extension (yr)
Crack filling	2–4	NA
Crack sealing	3–8	2–5
Slurry seal	3–5	4–5
Microsurfacing		
Single course	3–6	3–5
Double course	4–7	4–6
Chip seal		
Single course	3–7	5–6
Double course	5–10	8–10
Ultra-thin bonded wearing course	7–12	NA
Thin HMA overlay		
Dense graded	5–12	NA
Open graded (OGFC)	6–12	NA
Gap graded (SMA)	NA ^a	NA
Cold milling and thin HMA overlay	5–12	NA
Ultra-thin HMA overlay	4–8	NA
Hot in-place recycling		
Surface recycle and thin HMA overlay	6–10 ^b	NA
Remixing and thin HMA overlay	7–15 ^c	NA
Repaving	6–15	NA
Cold in-place recycling and thin HMA overlay	Between 6–8 and 7–15 ^d	NA
Profile milling	2–5	NA
Ultra-thin whitetopping	NA	NA

Sources: Peshkin et al. 1999; Lamptey et al. 2005; Peshkin and Hoerner 2005; Dunn and Cross 2001; Newcomb 2009; Cuelho et al. 2006; Okpala et al. 1999; Caltrans 2008; NDOR 2002.

Note: NA = Not available.

Fuente: Peshkin, (2011).

Basado en estos datos, se muestra la inversión que demanda cada ruta de acuerdo con los deterioros presentes:

Plan de Mantenimiento para la Ruta 1:

En la siguiente tabla se definen los deterioros y su nivel de severidad, describiendo también la cantidad de su extensión según su unidad de medida, la cual se ajusta muy bien para poder proponer cada tarea de mantenimiento.

Tabla 17

Propuesta Plan de Mantenimiento para Ruta 1

Propuesta Plan de Mantenimiento - Ruta 1									
Deterioro	Nivel de Severidad	Unidad	Cantidad	Tarea de Mantenimiento	Costo Unitario	Costo Año 0	Costo Año 4	Costo Año 8	Costo Año 12
1.1 Cuero de Lagarto	Alto	m2	95,30	Reconstrucción	\$37,62	\$3 585,19	\$4 051,26	\$4 577,92	\$5 173,05
1.1 Cuero de Lagarto	Bajo	m2	68,90	Sellado de Grietas	\$0,83	\$57,05	\$64,47	\$72,85	\$82,32
1.2 Grieta Longitudinal	Medio	m.l.	49,90	Sellado de Grietas	\$0,83	\$41,32	\$46,69	\$52,76	\$59,62
1.3 Reflejo de Juntas	Bajo	m2	33,80	Sellado de Viruta	\$3,01	\$101,81	\$115,04	\$130,00	\$146,89
2.1 Ahuellamiento	Bajo	m2	16,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$72,19	\$81,58	\$92,18	\$104,17
2.2 Abultamiento y Hundimiento	Medio	m.l.	4,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$18,05	\$20,39	\$23,05	\$26,04
3.2 Pulimiento Agregados	Bajo	m2	9,30	Sellado de Viruta	\$3,01	\$28,01	\$31,65	\$35,77	\$40,42
3.3 Desprendimiento Agregados	Medio	m2	3,00	Sellado de Viruta	\$3,01	\$9,04	\$10,21	\$11,54	\$13,04
3.4 Desgaste Superficial.	Medio	m2	111,70	Sobre capa delgada de MAC	\$9,04	\$1 009,32	\$1 140,53	\$1 288,80	\$1 456,35
4.2 Bache	Bajo	m2	15,20	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$68,58	\$77,50	\$87,57	\$98,96
4.3 Hueco	Medio	unidad	1,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$4,51	\$5,10	\$5,76	\$6,51
4.3 Hueco	Bajo	unidad	2,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$9,02	\$10,20	\$11,52	\$13,02
Costo Mantenimiento Anual						\$5 004,09	\$5 654,62	\$6 389,72	\$7 220,38
Costo Mantenimiento Total						\$24 268,80			

Fuente: Elaboración propia, Murillo (2024)

De acuerdo con lo detallado en la tabla anterior, para el plazo de 12 años en esta ruta se requiere una inversión total de \$24.268,80 (USD), siendo la de menor costo entre las tres rutas evaluadas. Esto concuerda con la evaluación PCI otorgada a esta sección de la vía, que se encuentra relativamente en mejor estado.

Plan de Mantenimiento para la Ruta 2:

A continuación, la tabla detalla el estado de la Ruta 2, indicando el grado de severidad y la extensión de cada tipo de deterioro. Además, se describe el plan de mantenimiento propuesto de acuerdo con los deterioros presentes en la vía:

Tabla 18

Propuesta Plan de Mantenimiento para Ruta 2

Propuesta Plan de Mantenimiento - Ruta 2									
Deterioro	Nivel de Severidad	Unidad	Cantidad	Tarea de Mantenimiento	Costo Unitario	Costo Año 0	Costo Año 4	Costo Año 8	Costo Año 12
1.1 Cuero de Lagarto	Alto	m2	153,80	Reconstrucción	\$37,62	\$5 785,96	\$6 538,13	\$7 388,09	\$8 348,54
1.1 Cuero de Lagarto	Medio	m2	108,60	Sellado de Grietas	\$0,83	\$89,92	\$101,61	\$114,82	\$129,75
1.2 Grieta Longitudinal	Medio	m.l.	62,70	Sellado de Grietas	\$0,83	\$51,92	\$58,66	\$66,29	\$74,91
1.2 Grieta Longitudinal	Bajo	m.l.	25,30	Sellado de Grietas	\$0,83	\$20,95	\$23,67	\$26,75	\$30,23
2.1 Ahuellamiento	Medio	m2	38,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$171,46	\$193,75	\$218,93	\$247,39
2.2 Abultamiento y Hundimiento	Medio	m.l.	11,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$49,63	\$56,08	\$63,38	\$71,61
2.5 Hinchamiento	Alto	m2	16,30	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$73,55	\$83,11	\$93,91	\$106,12
3.3 Desprendimiento Agregados	Medio	m2	9,80	Sellado de Viruta	\$3,01	\$29,52	\$33,35	\$37,69	\$42,59
3.4 Desgaste Superficial.	Alto	m2	57,30	Sobre capa delgada de MAC	\$9,04	\$517,76	\$585,07	\$661,13	\$747,08
3.4 Desgaste Superficial.	Medio	m2	145,40	Sobre capa delgada de MAC	\$9,04	\$1 313,83	\$1 484,63	\$1 677,64	\$1 895,73
4.2 Bache	Alto	m2	32,30	Sobre capa delgada de MAC	\$9,04	\$291,86	\$329,80	\$372,68	\$421,13
4.2 Bache	Medio	m2	19,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$85,73	\$96,87	\$109,47	\$123,70
4.2 Bache	Bajo	m2	33,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$148,90	\$168,25	\$190,13	\$214,84
4.3 Hueco	Alto	unidad	3,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$13,54	\$15,30	\$17,28	\$19,53
4.3 Hueco	Medio	unidad	6,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$27,07	\$30,59	\$34,57	\$39,06
Costo Mantenimiento Anual						\$8 671,58	\$9 798,89	\$11 072,75	\$12 512,20
Costo Mantenimiento Total						\$42 055,42			

Fuente: Elaboración propia, Murillo (2024)

En la ruta 2 se requiere una inversión total de \$42.055,42 para su rehabilitación.

Esta cifra destaca el estado crítico del pavimento, ya que es 1,73 veces mayor que la inversión necesaria para la Ruta 1, a pesar de que el tramo a reparar es más corto.

Plan de Mantenimiento para la Ruta 3:

A continuación, la tabla detalla el estado de la Ruta 3, indicando el grado de severidad y la extensión de cada tipo de deterioro. Además, se describe el plan de mantenimiento propuesto de acuerdo con los deterioros presentes en la vía:

Tabla 19

Propuesta Plan de Mantenimiento para Ruta 3

Propuesta Plan de Mantenimiento - Ruta 3									
Deterioro	Nivel de Severidad	Unidad	Cantidad	Tarea de Mantenimiento	Costo Unitario	Costo Año 0	Costo Año 4	Costo Año 8	Costo Año 12
1.1 Cuero de Lagarto	Medio	m2	95,30	Sellado de Grietas	\$0,83	\$78,91	\$89,17	\$100,76	\$113,86
1.2 Grieta Longitudinal	Bajo	m.l.	68,90	Sellado de Grietas	\$0,83	\$57,05	\$64,47	\$72,85	\$82,32
1.3 Reflejo de Juntas	Medio	m2	49,90	Sellado de Viruta	\$3,01	\$150,30	\$169,84	\$191,92	\$216,87
1.3 Reflejo de Juntas	Bajo	m2	33,80	Sellado de Viruta	\$3,01	\$101,81	\$115,04	\$130,00	\$146,89
1.4 Grietas en Bloque	Medio	m2	86,70	Sellado de Viruta	\$3,01	\$261,14	\$295,09	\$333,45	\$376,80
2.3 Corrugación	Medio	m2	103,50	Sobre capa delgada de MAC	\$9,04	\$935,23	\$1 056,81	\$1 194,19	\$1 349,43
3.2 Pulimiento Agregados	Medio	m2	9,30	Sellado de Viruta	\$3,01	\$28,01	\$31,65	\$35,77	\$40,42
3.2 Pulimiento Agregados	Alto	m2	3,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$13,54	\$15,30	\$17,28	\$19,53
3.3 Desprendimiento Agregados	Alto	m2	111,70	Reconstrucción	\$37,62	\$4 202,15	\$4 748,43	\$5 365,73	\$6 063,28
3.4 Desgaste Superficial.	Medio	m2	13,50	Sobre capa delgada de MAC	\$9,04	\$121,99	\$137,84	\$155,76	\$176,01
4.2 Bache	Medio	m2	95,20	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$429,54	\$485,38	\$548,48	\$619,79
4.2 Bache	Bajo	m2	1,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$4,51	\$5,10	\$5,76	\$6,51
4.3 Hueco	Bajo	unidad	2,00	Bacheo / Reciclado en frio en sitio	\$4,51	\$9,02	\$10,20	\$11,52	\$13,02
Costo Mantenimiento Anual						\$6 393,19	\$7 224,31	\$8 163,47	\$9 224,72
Costo Mantenimiento Total						\$31 005,70			

El análisis de esta ruta es particular, ya que, a pesar de ser la de mayor longitud (2,1 km), es la segunda en términos de inversión, con un costo total de mantenimiento de \$31.005,70 (USD).

Criterio ambiental y sus indicadores para las rutas de acceso

Dado que se trata de un análisis de sostenibilidad, es esencial considerar los componentes ambientales y sociales en conjunto.

Emissiones de CO2 (kg/m)

Se ha consultado la documentación relacionada con el informe del Lanamme, elaborado por Arias y Rodríguez (2018), titulado *Criterios Ambientales y Socioeconómicos para Priorizar Inversiones en la Red Vial de Costa Rica*. Este informe utiliza como respaldo un documento adicional de Chehovits y Galehouse (2010), titulado *Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements*, que presenta mediciones de CO2 asociadas a cada tarea de mantenimiento, considerando aspectos como la carpeta, los agregados, la manufactura, el transporte y la colocación por año (pp. 13-14). Los valores obtenidos son los siguientes:

Tabla 20

Emisiones de CO2 por Tarea de Mantenimiento por Unidad de Medida a 12 años

Tarea de Mantenimiento	Unidad de medida	Emisiones año (kg)	CO2 por 12 años
Sellado de Grietas	m.l.	0,08	0,96
Sellado de Viruta	m2	0,2	2,4
Sellado tipo Lechada	m.l.	0,1	1,2
Sobre-capa delgada de MAC	m2	1,3	15,6
Reciclado en frío en sitio / Bacheo	m2	1,5	18
Reciclado en caliente en sitio	m2	1	12
Reconstrucción	m2	0,7	8,4

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Cálculo Emisiones de CO2 para la ruta 1.

A continuación, se muestran los datos sobre las emisiones correspondientes a las tareas de mantenimiento propuestas para el deterioro de la Ruta 1. La tabla siguiente indica que el total es de 3.455,33 kg, lo que equivale a aproximadamente 287,94 kg por año.

Tabla 21

Emisiones de CO2 de la Ruta 1 por un plazo de 12 años

Emisiones CO2 - Ruta 1					
Tarea de Mantenimiento	Unidad	Cantidad	Emisiones por Unidad	CO2 por año	CO2 en 12 años
Bacheo / Reciclado en frío en sitio	m2	38,2	1,50	57,30	687,60
Reconstrucción	m2	95,3	0,70	66,71	800,52
Sellado de Grietas	m.l.	118,8	0,08	9,50	114,05
Sellado de Viruta	m2	46,1	0,20	9,22	110,64
Sobre capa delgada de MAC	m2	111,7	1,30	145,21	1 742,52
				Total	3 455,33

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Cálculo de emisiones de CO2 para la ruta 2.

A continuación, se muestran los datos sobre las emisiones correspondientes a las tareas de mantenimiento propuestas para el deterioro de la Ruta 2. La tabla siguiente indica que el total es de 7.443,58 kg, lo que equivale a aproximadamente 620,30 kg por año.

Tabla 22

Emisiones de CO2 de la Ruta 2 por un plazo de 12 años

Emisiones CO2 - Ruta 2					
Tarea de Mantenimiento	Unidad	Cantidad	Emisiones por Unidad	CO2 por año	CO2 en 12 años
Bacheo / Reciclado en frio en sitio	m2	126,3	1,50	189,45	2 273,40
Reconstrucción	m2	153,8	0,70	107,66	1 291,92
Sellado de Grietas	m.l.	196,6	0,08	15,73	188,74
Sellado de Viruta	m2	9,8	0,20	1,96	23,52
Sobre capa delgada de MAC	m2	235	1,30	305,50	3 666,00
				Total	7 443,58

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Cálculo de emisiones de CO2 para la ruta 3.

A continuación, se muestran los datos sobre las emisiones correspondientes a las tareas de mantenimiento propuestas para el deterioro de la Ruta 3. La tabla siguiente indica que el total es de 5.173,99 kg, lo que equivale a aproximadamente 431,17 kg por año.

Tabla 23

Emisiones de CO2 de la Ruta 3 por un plazo de 12 años

Emisiones CO2 - Ruta 3					
Tarea de Mantenimiento	Unidad	Cantidad	Emisiones por Unidad	CO2 por año	CO2 en 12 años
Bacheo / Reciclado en frío en sitio	m2	101,2	1,50	151,80	1 821,60
Reconstrucción	m2	111,7	0,70	78,19	938,28
Sellado de Grietas	m.l.	164,2	0,08	13,14	157,63
Sellado de Viruta	m2	179,7	0,20	35,94	431,28
Sobre capa delgada de MAC	m2	117	1,30	152,10	1 825,20
				Total	5 173,99

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Consumo Energético (MJ/m)

Para calcular anualmente la cantidad de energía utilizada en actividades de colocación de carpeta asfáltica, transporte, elaboración, manufactura e intervenciones viales, se ha recurrido al estudio de Chehovits y Galehouse (2010). El objetivo es determinar los siguientes valores.

Tabla 24.

Consumo energético por tarea de mantenimiento por unidad de medida a 12 años

Tarea de mantenimiento	Unidad de medida	Consumo energético por año (MJ)	12 años
Sellado de Grietas	m.l.	1,1	13,2
Sellado de Viruta	m2	3,3	39,6
Sellado Tipo Lechada	m.l.	2,4	28,8
Sobrecapa Delgada de MAC	m2	15,4	184,8
Reciclado en Frío en Sitio / Bacheo	m2	16,5	198
Reciclado en Caliente en Sitio	m2	13	156
Reconstrucción	m2	9,9	118,8

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Consumo Energético Ruta 1.

A continuación, se muestran los datos sobre el consumo energético correspondiente a las tareas de mantenimiento propuestas para el deterioro de la Ruta 1. En la siguiente tabla, se aprecia que el total es 42,921.12 MJ en 12 años, lo que equivale a aproximadamente 3,576.76 MJ por año.

Tabla 25.

Consumo energético de la Ruta 1 por un plazo de 12 años

Consumo energético							
Deterioro	Nivel de severidad	Unidad	Cantidad	Tarea de mantenimiento	Comuno unidad	Consumo 1 años	Total a 12 años
1.1 Cuero de lagarto	Alto	m2	95,3	Reconstruccion	9,9	118,8	11321,64
1.1 Cuero de lagarto	Bajo	m2	68,9	Sellado de grietas	1,1	13,2	909,48
1.2 Grieta longitudinal	Medio	m.1	49,9	Sellado de grietas	1,1	13,2	658,68
1.3 Reflejo de Juntas	Bajo	m2	33,8	Sellado de viruta	3,3	39,6	1338,48
2.1 ahuellamiento	Bajo	m2	16	Bacheo	16,5	198	3168
2.2 Abultamiento y hundimiento	Medio	m.1	4	Bacheo	16,5	198	792
3.2 Pulimiento de agregados	Bajo	m2	9,3	Sellado de viruta	3,3	39,6	368,28
3.3 Desprendimiento de agregados	Medio	m2	3	Sellado de viruta	3,3	39,6	118,8
3.4 Desgaste Superficial	Medio	m2	111,7	Sobre capa delg. De MA	15,4	184,8	20642,16
4.2 Bache	Bajo	m2	15,2	Bacheo	16,5	198	3009,6
4.3 Hueco	Medio	Unidad	1	Bacheo	16,5	198	198
4.3 Hueco	Bajo	Unidad	2	Bacheo	16,5	198	396
						Total	42921,12

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Consumo Energético ruta 2

A continuación, se muestran los datos sobre el consumo energético correspondiente a las tareas de mantenimiento propuestas para el deterioro de la Ruta 2. En la siguiente tabla, se aprecia que el total es 89,690.04 (MJ) en 12 años, lo que equivale a aproximadamente 7,474.17 (MJ) por año.

Tabla 26.

Consumo energético de la Ruta 2 por un plazo de 12 años

Consumo energético							
Deterioro	Nivel de severidad	Unidad	Cantidad	Tarea de mantenimiento	Comuno un	Consumo 1 años	Total a 12 años
1.1 Cuero de lagarto	Alto	m2	153,8	Reconstruccion	9,9	118,8	18271,44
1.1 Cuero de lagarto	Medio	m2	108,6	Sellado de grietas	1,1	13,2	1433,52
1.2 Grieta longitudinal	Medio	m.1	62,7	Sellado de grietas	1,1	13,2	827,64
1.2 Grieta longitudinal	Bajo	m.1	25,3	Sellado de grietas	1,1	13,2	333,96
2.1 ahuellamiento	Medio	m2	38	Bacheo	16,5	198	7524
2.2 Abultamiento y hundimiento	Medio	m.1	11	Bacheo	16,5	198	2178
2.5 Hinchamiento	Alto	m2	16,3	Bacheo	16,5	198	3227,4
3.3 Desprendimiento de agregados	Medio	m2	9,8	Sellado de viruta	3,3	39,6	388,08
3.4 Desgaste Superficial	Alto	m2	57,3	Sobre capa delg. De MAC	15,4	184,8	10589,04
3.4 Desgaste Superficial	Medio	m2	145,4	Sobre capa delg. De MAC	15,4	184,8	26869,92
4.2 Bache	Alto	m2	32,3	Sobre capa delg. De MAC	15,4	184,8	5969,04
4.2 Bache	Medio	m2	19	Bacheo	16,5	198	3762
4.2 Bache	Bajo	m2	33	Bacheo	16,5	198	6534
4.3 Hueco	Alto	Unidad	3	Bacheo	16,5	198	594
4.3 Hueco	Medio	Unidad	6	Bacheo	16,5	198	1188
						Total	89690,04

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Consumo Energético ruta 3

A continuación, se muestran los datos sobre el consumo energético correspondiente a las tareas de mantenimiento propuestas para el deterioro de la Ruta 3. En la siguiente tabla, se aprecia que el total es 64,212.72 (MJ) en 12 años, lo que equivale a aproximadamente 5,351.06 (MJ) por año.

Tabla 27.

Consumo energético de la Ruta 3 por un plazo de 12 años

Consumo energético							
Deterioro	Nivel de severidad	Unidad	Cantidad	Tarea de mantenimiento	Comuno unidad	Consumo 1 años	Total a 12 años
1.1 Cuero de lagarto	Medio	m2	95,3	Sellado de grietas	1,1	13,2	1257,96
1.2 Grieta longitudinal	Bajo	m.1	68,9	Sellado de grietas	1,1	13,2	909,48
1.3 Reflejo de Juntas	Medio	m1	49,9	Sellado de viruta	3,3	39,6	1976,04
1.3 Reflejo de Juntas	Bajo	m2	33,8	Sellado de viruta	3,3	39,6	1338,48
1.4 Grietas en bloque	Medio	m2	86,7	Sellado de viruta	3,3	39,6	3433,32
2.3 Corrugación	Medio	m2	103,5	Sobre capa delg. De MAC	15,4	184,8	19126,8
3.2 Pulimiento de agregados	Medio	m2	9,3	Sellado de viruta	3,3	39,6	368,28
3.2 Pulimiento de agregados	Alto	m2	3	Bacheo	16,5	198	594
3.3 Desprendimiento de agregados	Alto	m2	111,7	Reconstrucción	9,9	118,8	13269,96
3.4 Desgaste superficial	Medio	m2	13,5	Sobre capa delg. De MAC	15,4	184,8	2494,8
4.2 Bache	Medio	m2	95,2	Bacheo	16,5	198	18849,6
4.2 Bache	Bajo	m2	1	Bacheo	16,5	198	198
4.3 Hueco	Bajo	Unidad	2	Bacheo	16,5	198	396
						total	64212,72

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Criterio social y sus indicadores para las rutas de acceso.

El Criterio Social es el último factor considerado, el cual evalúa el impacto, ya sea positivo o negativo, que las decisiones tomadas tendrán sobre la sociedad afectada. Para realizar esta valoración de carácter social, se han establecido cuatro indicadores específicos.

Población (Personas)

Se simplificó la estimación de la población afectada en cada ruta por motivos de tiempo y facilidad, utilizando las proyecciones del Censo 2011 del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). Para el distrito de Tibás, se considera un índice de 1.00014 habitantes por unidad de vivienda. Además, se aplica una proyección del INEC de 3.8 para calcular el crecimiento poblacional, lo que ofrece un número más preciso. Por lo tanto, se realizó un conteo de unidades de vivienda en las cercanías de cada ruta, utilizando Google Maps para recopilar la información necesaria.

Tabla 28.

Población proyectada por ruta.

Ruta	Unidad de Vivienda	Población proyectada
Ruta 1	1279	4860.2
Ruta 2	1369	5202.2
Ruta 3	1493	5673.4

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024), con datos del cuadro 5, del INEC (2011, p. 18)

Tiempo de Recorrido (min)

Para evaluar este indicador social, se realizaron múltiples trayectos entre los puntos A, B y C, y viceversa, durante las horas de mayor afluencia de tráfico, conocidas como horas pico. Los datos fueron corroborados por el encargado de la municipalidad para garantizar una mayor veracidad. El objetivo fue calcular un tiempo promedio de

recorrido. Estas mediciones se llevaron a cabo de lunes a viernes, cada 30 minutos, y se recopiló la siguiente información.

Tiempo recorrido para ruta 1.

Tabla 29.

Tiempo de recorrido promedio para la ruta 1

Ruta 1						
Horario	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	
Mañana	7:00	6	6	6	7	7
	7:30	4	6	6	6	6
	8:00	4	4	4	6	4
	8:30	4	4	4	4	4
	9:00	4	4	4	4	4
Tarde	5:00	4	4	4	4	4
	5:30	4	4	5	5	5
	6:00	6	6	6	6	9
	6:30	9	10	10	10	10
	7:00	12	10	10	15	12
Tiempo promedio (min)	6.12 min					

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Tiempo recorrido para ruta 2.

Tabla 30.

Tiempo de recorrido promedio para la ruta 2

Ruta 2						
Horario	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	
Mañana	7:00	6	6	6	7	7
	7:30	5	5	5	5	5
	8:00	5	5	5	5	5
	8:30	5	4	4	4	4
	9:00	4	4	4	4	4
Tarde	5:00	4	4	4	4	4
	5:30	5	5	5	5	5
	6:00	6	6	6	6	6
	6:30	10	10	10	10	10
	7:00	12	10	10	15	12
Tiempo promedio (min)	6.14 min					

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Tiempo recorrido para ruta 3.

Tabla 31.

Tiempo de recorrido promedio para la ruta 3

Ruta 3						
Horario		Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Mañana	7:00	4	6	6	7	7
	7:30	4	5	5	5	5
	8:00	5	5	5	5	5
	8:30	5	4	4	4	4
	9:00	4	4	4	4	4
Tarde	5:00	4	4	4	4	4
	5:30	5	5	5	5	5
	6:00	6	6	6	6	6
	6:30	10	10	10	10	10
	7:00	12	10	10	15	12
Tiempo promedio (min)		5.82 min				

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Capacidad de Centros Educativos (Estudiantes)

Se decidió medir los servicios públicos mediante la capacidad o población estudiantil de los centros educativos cercanos, utilizando a los estudiantes como unidad de medida. Se realizó un análisis de los centros educativos, tanto privados como públicos (kínder, escuelas y colegios), obteniendo la siguiente información:

Tabla 32.

Capacidad de centros educativos alrededor de las rutas de acceso

Ruta	Escuela Miguel Obregón Lizano	Escuela Anselmo Llorente y La Fuente	Kínder Generación del Norte	Monte Verde	Saint Gabriel Elementary and High School	Total
Ruta 1	x		x	x	x	773
Ruta 2	x				x	515
Ruta 3		x	x			345
Población Estudiantil aproximada	149	298	47	211	366	1071

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024), en base a los datos recopilados de cada centro educativo.

Tránsito Promedio Diario (ESALS)

Este indicador social incluye a quienes utilizan su propio vehículo y a aquellos que se benefician de las rutas en estudio, aunque no residan cerca del cantón. El cálculo se realizó mediante un aforo vehicular de tres horas en distintos días.

TDP para la ruta 1.

Aforo vehicular de la ruta 1

Tabla 33.

Aforo vehicular para la ruta 1

Mañana	7 – 8 AM	Medio día	12– 1PM	Noche	6 – 7 PM
Total	851	Total	514	Total	922
				Total Compuesto:	2.287

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Cálculo del TDP para la ruta 1

Tabla 34.*TDP para la Ruta 1*

Total	Horas	Factor de expansión	TDP
2287	3	10	7.326

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

TDP para la ruta 2*Aforo vehicular de la ruta 2.***Tabla 35.***Aforo vehicular para la ruta 2*

Mañana	7 – 8 AM	Medio día	12– 1PM	Noche	6 – 7 PM
Total	658	Total	321	Total	598
				Total Compuesto:	1577

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

*Cálculo del TDP para la ruta 2.***Tabla 36.***TDP para la ruta 2*

Total	Horas	Factor de expansión	TDP
1577	3	10	5256

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

TDP para la ruta 3*Aforo vehicular de la ruta 3***Tabla 37.***Aforo vehicular para la ruta 3*

Mañana	7 – 8 AM	Medio día	12– 1PM	Noche	6 – 7 PM
Total	751	Total	384	Total	899
				Total Compuesto:	2034

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Cálculo del TDP para la ruta 3

Tabla 38.

TDP para la ruta 3

Total	Horas	Factor de expansión	TDP
2034	3	10	6780

Nota. Fuente: Elaboración propia (2024).

Evaluación en el Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible

En el proyecto de investigación, se ha modelado el árbol de requerimientos en la herramienta MIVES para simplificar el análisis. El primer nivel abarca los aspectos generales: económico, social y ambiental, conocidos como análisis de sostenibilidad. El siguiente nivel, criterios, establece los puntos de evaluación del nivel superior. Finalmente, el Nivel 3, indicadores, define la forma precisa de evaluar cada criterio. Así queda estructurado el Árbol de Decisión de la Investigación:

Figura 25

Árbol de Decisión del Proyecto



Fuente: Software MIVES, elaboración propia (2024)

Requerimientos

En la Figura 25 se muestra el árbol de requerimientos creado en la herramienta MIVES para analizar tres alternativas según la sostenibilidad, abarcando los aspectos económico, ambiental y social.

Criterios

Se han establecido subniveles llamados criterios dentro de los requerimientos:

- Económico: Evaluación de los Planes de Mantenimiento de cada ruta.
- Ambiental: Evaluación de las emisiones de CO₂ y el consumo energético para el mantenimiento de las vías.
- Social: Consideración de la población afectada, tiempo de recorrido en automóvil, servicios públicos y tránsito.

Indicadores

Para medir los siete criterios, se utilizan los siguientes indicadores:

- Costo de Plan de Mantenimiento (\$): Medido en dólares para un plan de 12 años por ruta.
- Emisiones de CO₂ (kg/m): Emisiones de CO₂ anuales por tarea de mantenimiento, en kilogramos por metro lineal.
- Consumo Energético (MJ/m): Consumo energético anual por tarea de mantenimiento, en Mega Joules por metro lineal.
- Población (Personas): Número de personas afectadas o beneficiadas por la intervención.
- Tiempo de Recorrido (min): Tiempo en minutos para viajar del centro del cantón a la comunidad de la Florida.
- Capacidad de Centros Educativos (Estudiantes): Número de estudiantes en centros educativos cercanos a las rutas.

- Tránsito Promedio Diario (ESALS): Cantidad de vehículos medida en ejes equivalentes de diseño.

Funciones de Valor

Cada indicador tiene una función de valor específica:

- Costo del Plan de Mantenimiento: Función lineal decreciente; el valor ideal es \$0,00 por metro lineal, con un valor mínimo aceptable de \$60,00. Superar este valor sugiere que la reconstrucción de la vía, con un costo aproximado de \$50,00 por metro lineal, sería más rentable.
- Emisiones de CO₂: Medidas en kilogramos por metro lineal, con una satisfacción máxima de 0 kg/m (ideal) y mínima de 25 kg/m. La función es lineal decreciente.
- Consumo Energético: Medido en Mega Joules por metro lineal. La satisfacción máxima es 50 MJ/m y mínima 250 MJ/m, con una función lineal decreciente. Aquí se busca penalizar los valores elevados de consumo energético.
- Población: Mide la cantidad de personas afectadas o beneficiadas, con una satisfacción máxima para 5,000 personas y mínima para 500 o menos. La función es lineal creciente.
- Tiempo de Recorrido: Expresado en minutos, con una función de escalón que asigna el valor de 1 a tiempos entre 3 y 5 minutos, 0,75 al intervalo entre 5 y 10 minutos, y 0,50 al intervalo entre 10 y 20 minutos.
- Capacidad de Centros Educativos: Mide el número de estudiantes en centros educativos cercanos. La satisfacción máxima es para 2,000 estudiantes y mínima para 500. La función es lineal creciente.
- Tránsito Promedio Diario: Medido en ESALS, con una satisfacción máxima para 20,000 ESALS y mínima para 5,000. La función es lineal creciente.

- Pesos: Se asignan porcentajes del 100% a cada elemento en los niveles del Árbol de Decisión, utilizando el método AHP y las proporciones de Saaty. Los pesos resultantes se reflejan en la estructura del Árbol de Requerimientos.

Figura 26

Pesos del Árbol de Requerimientos de la investigación

Requerimiento		Criterios		Indicadores	
33,33%	Ecónomico	100,00%	Planes de mantenimiento	100,00%	Costo Plan de mantenimiento
33,33%	Ambiental	60,00%	Emisiones de CO2	100,00%	Emisiones de CO2
		40,00%	Consumo energético	100,00%	Consumo energético
33,33%	Social	16,67%	Población	100,00%	Población
		33,33%	Tiempo de recorrido	100,00%	Tiempo de recorrido
		16,67%	Servicios públicos	100,00%	Servicios públicos
		33,33%	Tránsito diario	100,00%	Tránsito diario

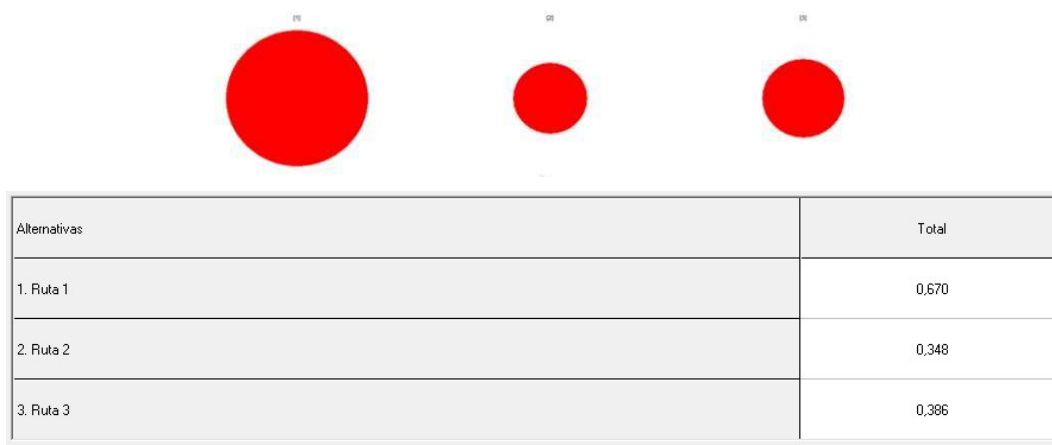
Fuente: Elaboración propia (2024)

Análisis de Sostenibilidad de las Rutas de Acceso

El análisis de sostenibilidad, basado en la información del apartado anterior, evalúa los indicadores económicos, ambientales y sociales de las tres rutas de acceso. Los resultados se resumen en el Módulo Reporte, que muestra que la ruta 1 obtiene el mejor puntaje con un 67,0% de aprobación, seguida por la ruta 3 con un 38,6% y la Ruta 2 con un 34,8%.

Figura 27

Gráfico de Pastel para Análisis Total de las Rutas de Acceso



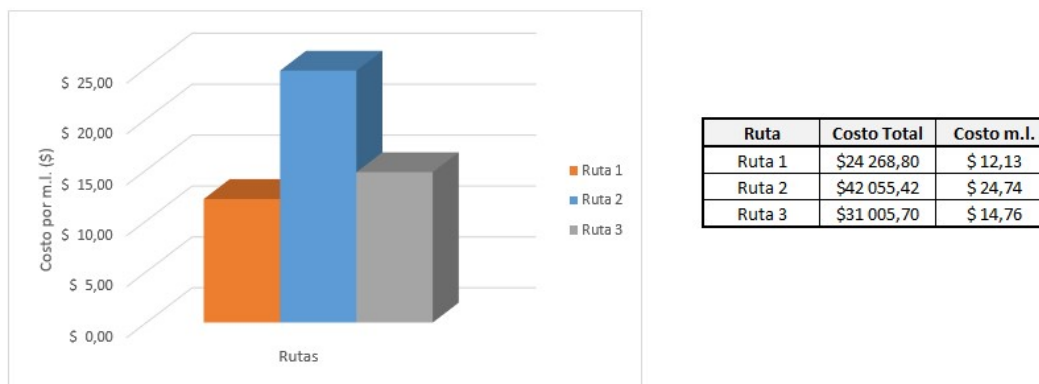
Fuente: Módulo Reporte Propio (MIVES)

Análisis Económico

El análisis económico se centra en el costo de mantenimiento. Por razones evidentes, la Ruta 1 ocupa el primer lugar debido a que su costo de mantenimiento es de solo \$12,13 por metro de carretera intervenida. La ruta 3 ocupa el segundo lugar con un costo de mantenimiento de \$14,76 por metro de carretera, y la ruta 2 queda en tercer lugar con un costo de mantenimiento de \$24,74 por metro lineal:

Figura 28

Gráfico de Barras para Costo de Planes de Mantenimiento



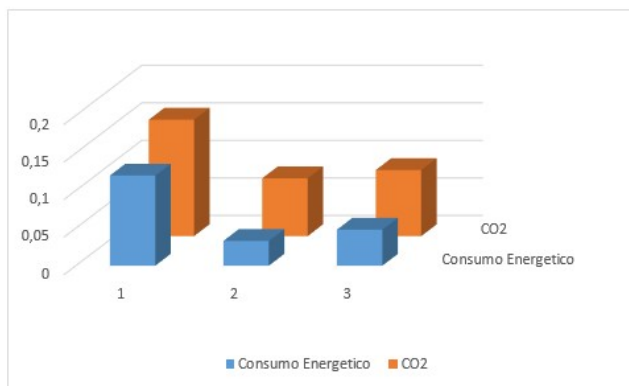
Fuente: Elaboración propia (2024)

Análisis Ambiental

El análisis ambiental considera las emisiones de CO₂ y el consumo energético. El color naranja indica las emisiones de CO₂ en kg/m, mientras que el azul representa el consumo energético en MJ/m. En esta evaluación, es importante tener en cuenta que las emisiones de CO₂ tienen un impacto más significativo, con un peso del 60%. Para realizar un análisis más preciso, se deben consultar los datos en la figura siguiente:

Figura 29

Gráfico de Barras para Análisis Ambiental de las Alternativas



Ruta	Emisiones de CO ₂	Consumo Energético	Total
Ruta 1	0,155	0,12	0,274
Ruta 2	0,077	0,033	0,11
Ruta 3	0,088	0,048	0,137

Fuente: Elaboración propia (2024)

- Ruta 1: lidera en ambos indicadores, con menores emisiones y consumo.
- Ruta 2: tiene el mayor impacto ambiental, con 4,37 kg de CO₂ y 52,76 MJ por metro lineal.

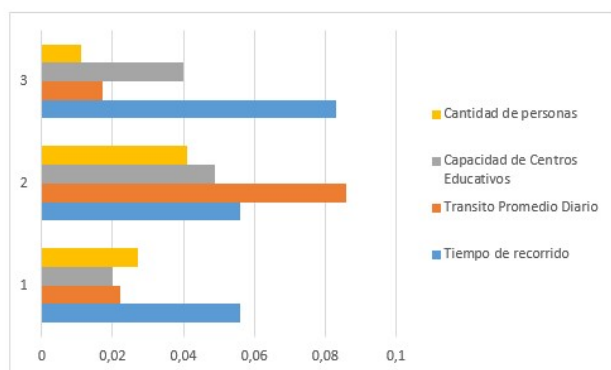
Análisis Social

Este análisis evalúa cuatro indicadores sociales. Desde una perspectiva visual, la Ruta 2 supera a las demás rutas en todos los indicadores clave, ya que presenta una mayor cantidad de personas, estudiantes y flujo de tránsito. Esto sugiere que tiene un

impacto social superior en comparación con las otras dos rutas. Por otro lado, al comparar la Ruta 1 con la Ruta 3, se observa que ambas presentan datos similares, siendo la principal diferencia el tiempo de recorrido. La Ruta 3 resulta ser más corta y menos utilizada, ya que muestra el menor flujo de tránsito entre las tres rutas. Esta diferencia se evidencia de manera más clara al analizar los datos detallados a continuación:

Figura 30

Gráfico de Barras para Análisis Social de las Alternativas



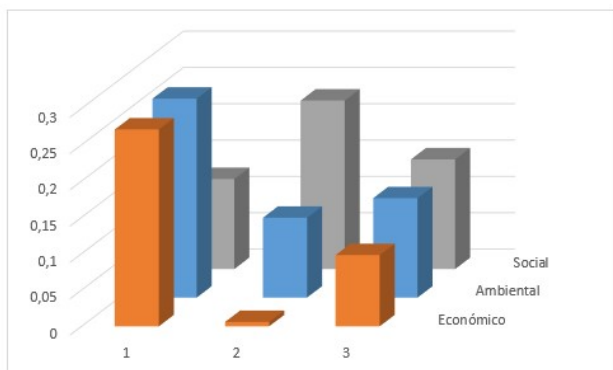
Ruta	Cantidad de personas	Tiempo de recorrido	Capacidad de Centros	Transito Promedio	Total
Ruta 1	0,027	0,056	0,02	0,022	0,124
Ruta 2	0,041	0,056	0,049	0,086	0,232
Ruta 3	0,011	0,083	0,04	0,017	0,151

Análisis General de Sostenibilidad

El análisis general de sostenibilidad muestra lo siguiente:

Figura 31

Gráfico de Barras para Análisis General de Sostenibilidad



Ruta	Económico	Ambiental	Social	Total
Ruta 1	0,271	0,274	0,124	0,67
Ruta 2	0,006	0,11	0,232	0,348
Ruta 3	0,098	0,137	0,151	0,386

En el gráfico presentado, se pueden observar tres barras que representan los diferentes requisitos: la barra naranja indica el aspecto económico, la azul el ambiental y la gris el social. Al analizar gráficamente, se observa que la ruta 1, que obtuvo el primer lugar, sobresale principalmente en los aspectos económico y ambiental en comparación con las otras dos opciones. Aunque su desempeño en el aspecto social fue inferior, esta ventaja en los otros dos factores le permitió obtener el primer puesto.

En segundo lugar, la ruta 3 se destaca en el pilar económico frente a la ruta 2. Sin embargo, en el ámbito social, la ruta 2 superó a las demás alternativas. A pesar de su ventaja en el aspecto social, la ruta 2 obtuvo el último lugar debido a su bajo desempeño en los aspectos económico y ambiental. Dado que todos los requisitos tienen el mismo peso, este resultado es significativo.

Considerando las puntuaciones asignadas, se determinan las posiciones finales de cada alternativa. En consecuencia, la ruta 1 ocupa el primer lugar, la ruta 3 se posiciona en el segundo lugar y la ruta 2 queda en el tercer lugar.

Propuesta Final de Priorización de los planes de Mantenimiento

El análisis de sostenibilidad busca determinar la condición de tres alternativas de rutas de acceso. La conclusión es que la Ruta 2 es la más deteriorada.

La investigación debe decidir cuál de las tres rutas intervenir primero y en qué orden. Basado en los resultados de MIVES, se decide intervenir la Ruta 2 primero debido a su peor estado, mientras que las Rutas 1 y 3, con pavimento en mejor condición, requieren menos inversión y pueden ser intervenidas juntas en otro año.

El plan prioriza comenzar con la Ruta 2 en 2025, con intervenciones cada cuatro años hasta 2036. Las Rutas 1 y 3 comenzarán su mantenimiento un año después, en

2026, también con ciclos de cuatro años, finalizando en 2037. Todo se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 39.

Propuesta de priorización de intervención de rutas de acceso

Año de Mantenimiento	Año Calendario	Ruta 1		Ruta 2		Ruta 3		Costo por Año (\$)
		Intervención	Costo (\$)	Intervención	Costo (\$)	Intervención	Costo (\$)	
Año 0	2025	x	\$0,00	Sí	\$8 671,58	x	-	\$8 671,58
	2026	Sí	\$5 004,09	x	-	Sí	\$6 393,19	\$11 397,28
Año 4	2028	x	-	Sí	\$9 798,89	x	-	\$9 798,89
	2029	Sí	\$5 654,62	x	-	Sí	\$7 224,31	\$12 878,93
Año 8	2032	x	-	Sí	\$11 072,75	x	-	\$11 072,75
	2033	Sí	\$6 389,72	x	-	Sí	\$8 163,47	\$14 553,19
Año 12	2036	x	-	Sí	\$12 512,20	x	-	\$12 512,20
	2037	Sí	\$7 220,38	x	-	Sí	\$9 224,72	\$16 445,10
Costo Total (\$)		\$24 268,80		\$42 055,42		\$31 005,70		\$97 329,91
Tipo de Intervención		Ver Tabla 17		Ver Tabla 18		Ver Tabla 19		

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- **Metodología PCI:** Derivada de la norma ASTM D6433-11, la metodología PCI permite evaluar el estado del pavimento mediante inspección visual y registro de deterioros. La metodología TDMV complementa esto al permitir la evaluación simultánea de múltiples criterios, ofreciendo resultados técnicos y objetivos que optimizan la toma de decisiones en proyectos de ingeniería.
- **Estado del pavimento:** Las rutas de acceso a la comunidad de La Florida de Tibás presentan los siguientes valores PCI: ruta 1 con un PCI de 64 (Bueno), ruta 2 con un PCI de 50 (Regular), y ruta 3 con un PCI de 54 (Regular).
- **Comparación de rutas:** Clasificando las rutas según la condición del pavimento, la ruta 1 es la mejor, seguida por la ruta 3, con la ruta 2 en el peor estado.
- **Plan de mantenimiento:** Se desarrolló un plan de mantenimiento para cada ruta. Los costos estimados son: ruta 1, \$24,268.80; Ruta 2, \$42,055.42; ruta 3, \$31,005.70, con un plazo de 12 años e intervenciones cada cuatro años.
- **Decisión de intervención:** Basado en los resultados de MIVES, se priorizó la intervención de la ruta 2 en 2025 debido a su mal estado y mayor impacto social, con finalización en 2036. Las rutas 1 y 3 se intervendrán simultáneamente a partir de 2026, finalizando en 2037.
- **Modelo de evaluación:** La decisión se basa en un análisis exhaustivo de criterios, lo que implica que, si los criterios fueran diferentes, el resultado también podría variar. Se asignaron pesos iguales a los aspectos social, ambiental y económico para garantizar una decisión sostenible, aunque esto redujo la importancia de los indicadores individuales.

- **Análisis multivariable:** Cada caso debe analizarse individualmente para asignar los pesos adecuados en la toma de decisiones multivariable, buscando modelos de valor que permitan decisiones fundamentadas en criterios técnicos.
- **Uso de múltiples variables:** Considerar una amplia gama de variables en proyectos de ingeniería civil mejora la precisión y respaldo de las decisiones. Basarse únicamente en el PCI podría llevar a decisiones incompletas, omitiendo impactos ambientales y sociales.

Recomendaciones

- **Precisión en PCI:** Es crucial que la metodología PCI se aplique de manera ordenada y precisa, especialmente en el levantamiento de deterioros en campo, ya que cualquier error podría alterar significativamente los resultados.
- **Análisis multivariable:** Para realizar un análisis multivariable eficaz, es fundamental definir claramente los parámetros y la importancia de cada criterio. En casos complejos, se recomienda consultar con expertos en áreas específicas.
- **Comparación efectiva:** En análisis comparativos, se debe enfocar en factores que realmente difieren, evitando comparaciones redundantes que puedan desviar la atención de aspectos clave.
- **Intervenciones periódicas:** Se recomienda que las intervenciones de mantenimiento no excedan los cuatro años, para mantener el pavimento en condiciones manejables y evitar la necesidad de reconstrucción total, lo que incrementaría significativamente los costos.
- **Toma de decisiones técnicas:** Los profesionales encargados del mantenimiento vial deben basarse en criterios técnicos objetivos y evitar decisiones influenciadas por razones políticas o subjetivas.

- **Investigaciones futuras:** Se sugiere que otros estudiantes realicen investigaciones similares utilizando los mismos o similares indicadores para comparar resultados y establecer este proyecto como un modelo para la gestión de recursos en infraestructura vial.

REFERENCIAS

- American Society of Testing Materials. (2004). Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en caminos y estacionamientos (ASTM D6433). Estados
- Araya, J et al. (2015). Plan de Gestión de Pavimentos para la Ciudad de la Investigación de la Universidad de Costa Rica. Universidad de Costa Rica.
- Arias, R. & Rodríguez, J. (2018). Criterios ambientales y socioeconómicos para priorizar inversiones en la red vial de Costa Rica. Lanamme UCR, Costa Rica, 12-19 p.
- Barba-Romero, S. (1996). Manual para la Toma de Decisiones Multicriterio. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), Santiago, Chile.
- Catálogo de Deterioros del Manual de Auscultación Vial del MOPT. Guía para Profesionales (2016).
- Chehovits, J & Galehouse, L (2010). Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete. Pavements. National Center for Pavement Preservation, Okemos, Michigan, United States
- Contreras, G. (2023). El LanammeUCR realizó auditoría a rutas nacionales. Web UCR. Retrieved August 2, 2024, from <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2023/4/19/el-lanammeucr-realizo-auditoria-a-rutas-nacionales.html>
- Coto-Sánchez, J. D. (2016). Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a carreteras de tránsito pesado. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6792>

- Coronado, J. (2002). Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos. Secretaría de Integración Económica Centroamericana, Costa Rica
- Coronado, J. (2002). Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos. Secretaría de Integración Económica Centroamericana, Costa Rica, 289 p.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). "Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches"
- Cruz, E. (2013). La importancia de cumplir los niveles de servicio de la infraestructura carretera en México (Tesis para optar por el el grado y título de Ingeniero Civil). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Cuellar Centeno, J. L. (2022). Solución Vial Congruente al Índice de Condición del Pavimento Flexible Aplicando la Norma ASTM D6433 en el Jr. Alonso Mercadillo.
- Díaz, J. (2017). Desarrollo y Aplicación de un Nuevo Sistema de Rating para la Evaluación de la Sostenibilidad de los Proyectos de Infraestructuras en Países Subdesarrollados (SIRSDEC). Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación.
- Hernández Bámaca, J. C. (2020). Evaluación del desempeño de pavimentos rígidos en función a su índice de condición del pavimento (PCI) y criterios de sostenibilidad en tres segmentos del tramo CA-01 Occidente de estación 018+ 815 a estación 124+ 200 (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- HUANG, Yang. Pavement Analysis and Desing [en línea]. 2° ed. United States of America: Pearson Prentice Hall. 2004. [Fecha de consulta :25 de octubre]

Disponible en: <https://www.iberlibro.com/buscar-libro/titulo/pavementanalysis-design/autor/yang-huang/>

- Manual MIVES (2009). Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles: Evaluación de la Sostenibilidad en Ingeniería Civil. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Mata, D. (2010). Índices de Condición de Pavimentos Flexibles. Universidad de Costa Rica. Moreno, J (2018). Estudio Comparativo de Sostenibilidad en Carreteras Mexicanas. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- MOPT. (2015). Manual de especificaciones generales para la conservación de caminos, carreteras y puentes. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.(MOPT). San José, Costa Rica. 245 43.
- MOPT. (2016). Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica (MAV 2016). Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). San José, Costa Rica.
- Malo Domínguez, D. K. (2020). Evaluación del pavimento flexible mediante el método PCI basado en la Norma ASTM D6433-18, con el apoyo de un software en gabinete, en la Av. Bernard Balaguer-Lurigancho Chosica, 2019.
- Smith, K., Harrington, D., Pierce, L., & Preshant Ram, a. K. (2014). Concrete Pavement Preservation Guide, Second Edition. FHWA Publication No. FHWA-HIF-14-014. Washington, D.C. USA. Recuperado de:<https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/38556>.
- Peshkin, D et al. (2011). Guidelines for the Preservation of High Traffic Volume Roadways. Transportation Research Board, Washington, D.C, Estados Unidos.

- Rabanal, J (2014). Análisis del Estado de Conservación del Pavimento Flexible de la Vía de Evitamiento Norte, utilizando el Método del Índice de Condición del Pavimento.
- Rebolledo, R. J. (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Universidad austral de Chile.
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfcim672d/doc/bmfcim672d.pdf>
- Robles, R (2015). Cálculo del Índice de Condición del Pavimento (PCI) Barranco-Surco-Lima. Universidad Ricardo Palma, Perú.
- Rodríguez, E. (2009). Cálculo de Índice de Condición del Pavimento en la Av. Luis Montero, Distrito de Castilla. Universidad de Piura, Perú.
- Rodríguez, R. (2006). Plan de mantenimiento vial a largo plazo en la zona urbana, caso: Municipalidad de Curridabat. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Tábor Cruz, O. A. (2021). Guía de gestión de pavimentos con base en técnicas de preservación de pavimentos flexibles y rígidos.
<https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/84466>
- Vargas, Y. (2018). Propuesta de un plan de mantenimiento para la Ruta Nacional N° 122 mediante la evaluación de los niveles de deterioros presentes en el pavimento utilizando el método del PCI. Universidad Central, Costa Rica.
- Vásquez, B. M. (2014). Análisis comparativo entre un pavimento rígido y un pavimento flexible para la ruta s/r: Santa Elvira–El Arenal, en la comuna de Valdivia. Valdivia-Chile: Universidad Austral de Chile.
- Viñolas, B. et al. (2009). MIVES: Modelo Integrado de Valor Para Evaluaciones de Sostenibilidad-ICSMM. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

Vergara Vera, P. (2017). Análisis multivariado para toma de decisiones. Ediciones UTEM. <https://editorial.utem.cl/publicaciones/analisis-multivariado-para-toma-de-decisiones/>

Apéndice 1

Gráficos para el Cálculo de Valores Deducidos

- Pavimentos Flexibles

