



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

**ESTADO DEL ARTE DE TECNOLOGÍAS EMERGENTES Y METODOLOGÍAS
TRADICIONALES PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FAEDIS

2023



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**ESTADO DEL ARTE DE TECNOLOGÍAS EMERGENTES Y METODOLOGÍAS
TRADICIONALES PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES**

HENRY ARMANDO PERDOMO

DIRECTOR: ING. JOSÉ PEDRO BLANCO ROMERO

NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FAEDIS

2023

Nota de aceptación

Aprobado por el comité según los requisitos

Exigidos por la Universidad Militar Nueva

Granada



Director

Jurado

UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

Jurado

DEDICATORIA

A Dios, a mi familia, a los docentes, quienes tuvieron paciencia durante todo el proceso.



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Militar Nueva Granada, por permitirme volver realidad el sueño de convertirme en Ingeniero Civil.

Al profesor José Pedro Blanco Forero, por su dedicación y guía oportuna durante el desarrollo de este proyecto de grado.



CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN.....	12
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2.1 Pregunta de investigación.....	21
2.2 Objetivo General.....	21
2.3 Objetivos Específicos	22
3 JUSTIFICACIÓN.....	23
4 ANTECEDENTES.....	27
5 MARCO DE REFERENCIA TEÓRICO	34
5.1 ¿Qué es un pavimento?.....	34
5.2 Pavimento asfáltico.....	34
5.3 Sistemas de gestión de pavimentos	37
5.4 Inspección en tiempo real.....	37
5.5 Metodologías de evaluación.....	38
5.6 Tipos de falla del pavimento flexible	39
5.7 Daño superficial.....	40
5.7.1 Parches en mal estado	40
5.7.2 Baches y tratamientos superficiales.	41
5.7.3 Ahuellamientos.....	42
5.7.4 Deformación transversal.	43
5.7.5 Exudaciones	44
5.7.6 Desgaste	44
5.7.7 Pérdida de áridos	45
5.7.8 Ondulaciones.....	46

5.8	Fisuras y grietas	46
5.8.1	Fatigamiento.....	46
5.8.2	Fisuras y grietas en bloque	47
5.8.3	Grietas de borde.	48
5.8.4	Grietas transversales y longitudinales.	48
5.8.5	Fisuras y grietas reflejadas.	49
5.9	Otros daños	50
5.9.1	Descenso de la berma.....	50
5.9.2	Surgencia de agua y finos.....	50
5.9.3	Separación entre pavimento y berma.	51
5.10	Índices para evaluación de fallas en el pavimento.....	52
5.10.1	Índice de Condición del Pavimento (PCI).....	53
5.10.2	Índice de Rugosidad Internacional (RD).....	55
5.10.3	Índice de Serviciabilidad del Pavimento (PSI).....	56
5.11	Periodos de diseño de las obras de rehabilitación del pavimento	56
6	METODOLOGÍA.....	58
6.1	Paradigma de investigación	62
6.2	Enfoque de la investigación: enfoque cualitativo.....	62
6.3	Técnicas de recolección de datos: análisis documental.....	63
6.4	Sistemas de gestión de pavimentos	63
6.5	Matriz bibliográfica	64
7	RESULTADOS	66
7.1	Tecnologías tradicionales	66
7.1.1	Inspección visual	67
7.1.2	Equipo GERPHO	67

7.1.3	Deflectometría.....	69
7.1.4	Deflectómetro de caída de peso (FWD).....	70
7.1.5	Deflectómetro de peso ligero (LWD).....	71
7.1.6	Deflectómetro de haz de Benkelman (BBD).....	72
7.2	Tecnologías emergentes	76
7.2.1	Cámara digital	81
7.2.2	Drones o vehículos aéreos no tripulados (UAVs).....	82
7.2.3	Cámara de escaneo lineal	83
7.2.4	Imagen 3D por láser	84
7.2.5	Escáner Láser Terrestre (TLS)	85
7.3	Análisis de resultados	85
8	CONCLUSIONES.....	88
9	BIBLIOGRAFIA.....	90
10	ANEXO A.....	97



UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Clasificación del estado de la vía según INVIAS	25
Tabla 4.1. Rangos de clasificación del PCI.....	28
Tabla 4.2. Clasificación de las actividades de acuerdo al rango PCI.....	30
Tabla 5.1 Deterioros más comunes del pavimento	38
Tabla 5.2. Índices comunes para la evaluación de pavimentos.....	52
Tabla 5.3. Valores PCI	54
Tabla 5.4. Periodos de diseño de las obras de rehabilitación de los pavimentos asfálticos de las carreteras nacionales.	56
Tabla 7.1. Calificación tecnologías tradicionales	75
Tabla 7.2. Clasificación de soluciones tecnológicas emergentes.....	77
Tabla 7.3. Calificación tecnologías emergentes.....	78
Tabla 7.3. Sistemas comerciales de adquisición de datos automático en pavimentos	80



UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 . Estado de la Red Vial Pavimentada en 2022	26
Figura 5.1. Estructura del pavimento asfaltico.....	35
Figura 5.2. Distribución de cargas en el pavimento asfaltico	36
Figura 5.3. Deterioro superficial por parches deteriorados.....	41
Figura 5.4. Deterioro superficial por baches	42
Figura 5.5. Deterioro superficial con ahuellamiento.....	43
Figura 5.6. Deterioro superficial por deformación transversal	43
Figura 5.7. Deterioro superficial por exudaciones	44
Figura 5.8. Deterioro superficial por desgaste	45
Figura 5.9. Deterioro superficial por perdida de áridos	45
Figura 5.10. Deterioro superficial por ondulaciones.....	46
Figura 5.11. Fatigamiento	47
Figura 5.12. Fisuras y grietas en bloque	47
Figura 5.13. Grietas de borde	48
Figura 5.14. Grietas transversales y longitudinales	49
Figura 5.15. Fisuras y grietas reflejadas.....	49
Figura 5.16. Descenso de la berma	50
Figura 5.17. Surgimiento de agua y finos	51
Figura 5.18. Separación entre pavimento y berma.....	51
Figura 5.19. Etapas de recolección de información y evaluación del pavimento.	57
Figura 6.1. Marco metodológico para realizar comparación entre tecnologías	61
Figura 6.2. Etapas de un Sistema de Gestión de Pavimento (PMS)	64
Figura 7.1. Equipo Gerpho. Unidad filmadora. Vista lateral.	68
Figura 7.2. Deflectómetro FWD	70
Figura 7.3. Deflectómetro LWD	71
Figura 7.4. Sistemas automáticos de adquisición de datos en pavimentos	79
Figura 7.5. Diagrama de captación de imagen.....	81
Figura 7.6. Vehículos no tripulados (UAVs)	83

RESUMEN

El objetivo del estudio es comparar las tecnologías tradicionales utilizadas para detectar fallas en los pavimentos con las tecnologías emergentes, las cuales surgen para mejorar el rendimiento en la etapa de procesamiento de datos y garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos. Se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva para identificar las ventajas y desventajas de cada tecnología y su viabilidad de implementación en Colombia. Se encontró que las tecnologías emergentes, como el escaneo láser terrestre y el análisis de imágenes con drones y cámaras, ofrecen mayor precisión, eficiencia, confiabilidad, facilidad de uso y menor costo en comparación con las tecnologías tradicionales. Además, estas tecnologías son cada vez más accesibles y fáciles de implementar en diferentes contextos, incluyendo países en desarrollo como Colombia.

Es importante destacar que la implementación de estas tecnologías emergentes requiere una planificación adecuada y capacitación adecuada del personal para su correcto uso. La evaluación de la calidad de los pavimentos flexibles debe ser un proceso continuo y sistemático para detectar y corregir oportunamente los daños y desgastes del pavimento antes de que se conviertan en problemas mayores y costosos. Para mejorar la calidad de la evaluación de los pavimentos flexibles en Colombia, se sugiere fortalecer la investigación y el desarrollo de tecnologías emergentes, promover la colaboración entre las instituciones públicas y privadas, fomentar la creación de redes de colaboración y la implementación de políticas y programas de capacitación.

1 INTRODUCCIÓN

Las carreteras inevitablemente experimentan un proceso de deterioro, por lo que el mantenimiento de estas estructuras es fundamental para preservar la red de caminos y senderos, garantizar un rendimiento óptimo y cumplir con los estándares de servicio. El mantenimiento y refuerzo de los pavimentos en servicio es esencial para corregir los defectos que afectan la seguridad, comodidad y velocidad del tránsito vehicular. La presencia de múltiples factores de distintos orígenes puede afectar negativamente la superficie de rodamiento de los pavimentos. Algunos de estos factores incluyen el aumento en la cantidad y frecuencia de cargas, problemas durante el proceso de construcción, diseños poco adecuados, condiciones climáticas desfavorables, falta de mantenimiento y dificultades en el suministro de materiales. Estos son solo algunos de los principales aspectos que contribuyen a esta problemática. Por esta razón, es fundamental optimizar el empleo de materiales, maquinaria, mano de obra especializada y recursos económicos en las tareas de construcción y conservación de la red de carreteras. En lugar de enfocarse en la construcción de nuevos tramos, se debe poner mayor énfasis en conservar la red existente para garantizar la transitabilidad durante un periodo prolongado que justifique la inversión necesaria. La importancia de abordar estos problemas radica en la necesidad perentoria de mantener la seguridad y comodidad del tránsito vehicular en las vías públicas.

En países subdesarrollados como el nuestro, históricamente ha habido una falta de cultura en cuanto al mantenimiento integral de las carreteras. Los estados se preocupaban principalmente por mantener las vías despejadas para permitir la circulación de vehículos, pero no existían planes que garantizaran un adecuado estado de los elementos constitutivos de las carreteras. (Escobar-Rojas et al., 2010). En realidad, las vías se construían y se dejaban sin tomar las medidas mínimas para mantener los componentes que garantizaban la seguridad del usuario. Esta situación prevaleció desde el establecimiento del sistema de carreteras hasta la década de los años 90. Es importante destacar que esta situación ha ido cambiando en los últimos años, y se ha comenzado a tomar conciencia sobre la importancia del mantenimiento adecuado de las carreteras. Se han implementado programas y proyectos para mejorar la infraestructura vial y así garantizar la seguridad de los usuarios. Sin embargo, aún queda camino por recorrer para alcanzar estándares óptimos de mantenimiento en todas las vías del país.

Es cierto que en la actualidad existen esquemas similares para el mantenimiento de las vías en muchos lugares, pero no hay una estandarización completa de los procesos y la forma en que se deben ejecutar. Aunque se pueden establecer directrices generales, cada área geográfica y cada proyecto de mantenimiento pueden requerir enfoques específicos según las condiciones locales y las necesidades particulares de las carreteras. La falta de estandarización puede deberse a varias razones, como la variabilidad en las condiciones climáticas, los tipos de suelo, el tráfico y los recursos disponibles. Además, los avances tecnológicos y las investigaciones en el campo del mantenimiento de pavimentos continúan evolucionando, lo que puede generar diferentes enfoques y técnicas (INVIAS, 2016).

Para mantener en excelentes condiciones la transitabilidad y la seguridad del usuario, es importante seguir metodologías avaladas para la inspección de pavimentos (INVIAS & Universidad Nacional de Colombia, 2006), y programar ciclos de auscultación y reparación en las vías. En general, se recomienda realizar brigadas de mantenimiento cada seis o cuatro meses, donde se llevan a cabo tareas como el sellado de grietas en el pavimento, bacheo y pequeñas reparaciones (Escobar-Rojas et al., 2010).

El sellado de grietas es una medida preventiva que ayuda a evitar el deterioro posterior del pavimento al prevenir la infiltración de agua y otros materiales. Además, las reparaciones puntuales como el bacheo se realizan de manera inmediata para corregir los huecos en la vía y garantizar la seguridad de los usuarios. En casos donde se requieran obras más complejas, como refuerzos estructurales, las actividades se programarán de acuerdo con los parámetros establecidos en los contratos de concesión, o cuando las autoridades viales determinen que es necesario (Gamboa-Beltrán, 2019). Estas obras de mayor envergadura se planifican y ejecutan para garantizar la estabilidad y capacidad estructural del pavimento.

Es fundamental contar con una planificación adecuada y recursos suficientes para llevar a cabo las labores de mantenimiento de manera oportuna y eficiente. Además, es importante que las autoridades viales realicen inspecciones periódicas de las vías y establezcan criterios claros para determinar el momento y el tipo de intervención requerida en cada caso.

El mantenimiento regular y adecuado de las vías contribuye a prolongar su vida útil, mejorar la calidad de conducción y garantizar la seguridad vial para todos los usuarios (Mendoza-Castro, 2021). Es de vital importancia tener conocimiento sobre el estado de las carreteras mediante la

utilización de herramientas de evaluación de pavimentos. Una de estas herramientas es la auscultación superficial, que se trata de un método sencillo de aplicación que permite identificar y analizar los deterioros presentes en la capa de rodadura. Su objetivo principal es proporcionar una evaluación precisa de las necesidades de la vía en términos de mantenimiento y reparación. Se cuentan con diversos sistemas de evaluación superficial de pavimentos, que incluyen el Manual para la Clasificación de Condición de Pavimentos Flexibles del Ministerio de Transporte de Ontario en Canadá (Ministry of Transportation, 2016), el Sistema de Clasificación del Estado del Pavimento (PCR) del Departamento de Transporte de Ohio en Estados Unidos (The Ohio Department of Transportation, 2006), el método ASTM D6433-20 de (ASTM International, 2020), y la Metodología de Auscultación Francesa VIZIR (LCPC, 1991).

En el año 2002, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de Colombia implementó el método francés VIZIR para llevar a cabo la inspección de daños en las vías que forman parte de la red vial nacional y cuentan con pavimento asfáltico (Mendoza-Castro, 2021). Mas adelante, en el año 2008, el Ministerio de Transporte llevó a cabo un proyecto como parte del Plan Vial Regional para realizar un inventario de las carreteras secundarias y parte de las carreteras terciarias de los departamentos. En los pliegos de condiciones establecidos, se determinó que para evaluar el estado de la superficie de las vías con pavimento asfáltico o de concreto, se debía calcular el Índice de Condición de Pavimento (PCI) siguiendo las directrices establecidas en el documento titulado "PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI) PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS Y DE CONCRETO EN CARRETERAS", elaborado por el ingeniero especialista Luis Ricardo Vásquez Varela (Vásquez-Torres & Ospina-Gómez, 2010).

Para establecer la edad en la cual el pavimento flexible requiere ser repotenciado o rehabilitado se utiliza el índice PCI en función del número de ejes equivalentes, consiguiendo visualizar el avance del deterioro en el tiempo (Barros-Lozano & Gómez-Hernández, 2017). En los primeros años, el deterioro es lento y poco visible, luego llega una etapa crítica del ciclo de vida para dar paso a un deterioro acelerado y punto de quiebre, llegando al culmen de la vida útil del pavimento (Martínez-Alarcón, 2015). La vida útil mínima de un pavimento flexible debe ser de 8 años, y generalmente tiene una duración aproximada de 20 años (Gamboa-Beltrán, 2019). Otras fuentes indican una vida útil entre los 10 a 15 años (EADIC, 2015).

En términos generales, Colombia cuenta con una extensa red de carreteras que abarca un total de 206.102 km (Logistic Cluster, 2023). Dentro de esta red, el 6.9% de las vías, equivalente a 16.983 km, corresponden a la red primaria, que incluye las grandes autopistas y carreteras a cargo del gobierno nacional. El 21% de la red, que representa 44.400 km, pertenece a la red secundaria, la cual conecta municipios y regiones dentro de cada departamento y está bajo la responsabilidad de las gobernaciones. La mayor parte de la red, aproximadamente el 69.46%, corresponde a la red terciaria, con una extensión de 142.284 km. Esta red terciaria está compuesta por caminos y carreteras interveredales que conectan áreas rurales y comunidades locales, y su administración y mantenimiento recaen en los municipios. El Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2023), tiene a su cargo 10.918.58 kilómetros de vías, de los cuales el 79.78% se encuentra pavimentada, el 20.22% sin pavimentar.

El informe más reciente del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2023), a través de la Subdirección de Planificación de Infraestructura, presenta un análisis detallado del estado actual de las vías en todo el territorio nacional, clasificándolas en categorías que van desde muy buen estado hasta muy malo. Según este informe, en el caso de las vías pavimentadas, se ha identificado que, de 8.826 kilómetros evaluados, aproximadamente 1.642,70 kilómetros se encuentran en mal estado, lo que representa aproximadamente el 18,61% de las carreteras pavimentadas con deficiencias en su infraestructura. Estas cifras corresponden al segundo semestre de 2021, y en comparación con períodos anteriores, se registró un incremento del 19,46% o 1.719,82 kilómetros en esta categoría (Portafolio, 2022). Según (INVIAS, 2023), en la actualidad, se estima que el 45% de las carreteras en Colombia se encuentran en condiciones deficientes, al igual que el 18% de las vías asfaltadas. Esta situación indica que una parte significativa de la infraestructura vial del país presenta problemas y requiere atención y mejoras en términos de mantenimiento y reparación.

Particularmente, en la ciudad de Bogotá, el distrito cuenta con 14.536.9 km carril de malla vial. En relación al estado de la red vial de Bogotá (Instituto de Desarrollo Urbano IDU & INVIAS, 2021), las categorías más relevantes en la red vial de Bogotá en 2021 fueron: 71% en buen estado, 18% en estado regular, y el 11% en mal estado. Según datos de (Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UMV), 2023), entre el 01 de enero y el 31 de mayo de 2023, 136.7 km de carriles fueron mejorados, 117.884 huecos tapados y 1272 calles intervenidas.

Las labores de mantenimiento de las vías son definidas por el Manual de Mantenimiento de Carreteras del INVIAS, (2016), y el caso particular de los pavimentos se consideran actividades de mantenimiento rutinario, y mantenimiento periódico. Las primeras se refieren a actividades que se llevan a cabo durante todo el año para reparar o reemplazar los daños que ocurren en la carretera y sus elementos relacionados. Estas actividades no dependen en gran medida del volumen de tráfico o las condiciones climáticas. Las segundas a acciones requeridas ocasionalmente con una periodicidad superior a un año, programadas previamente y son determinadas por el tránsito y las condiciones meteorológicas.

En la ingeniería de pavimentos, se busca integrar las actividades de planificación, diseño, construcción, mantenimiento y rehabilitación de manera integral. Sin embargo, en países en desarrollo con recursos limitados, se recomienda realizar el diseño y la comparación de alternativas viables de rehabilitación basadas en la capacidad del pavimento y la disponibilidad de fondos inmediatos. Se realiza un análisis de costos a lo largo del ciclo de vida, con la esperanza de establecer una política de compromiso gubernamental a largo plazo para el mantenimiento de la red vial nacional (INVIAS, 2016). La periodicidad de las obras de restauración depende de diversos factores que afectan la vida útil del pavimento, generalmente relacionada con el volumen de tránsito establecido por un periodo de diseño.

El diagnóstico de las patologías en estructuras de pavimento durante el servicio implica la recopilación de información útil para el proyecto y el análisis de varios estudios. La información a consultar incluiría aspectos como geología, topografía, suelos, espesores y calidad de capas de pavimento, drenaje, tránsito, ambiente, diseño de mezclas y pavimentos. También se requiere un examen superficial del pavimento que incluya la evaluación del estado de la carretera y su entorno, y la detección de posibles fallas y zonas prioritarias de conservación. Esta evaluación proporciona información útil para futuros trabajos de conservación y puede confirmar o modificar los criterios de diseño actuales. Se requiere una metodología sistemática para llevar a cabo una inspección visual que esté orientada a la finalidad que justifica la inspección, como la elaboración de un inventario para un banco de datos, programar una actuación en un tramo concreto o definir las zonas puntuales que requieren reparación. Una inspección visual adecuada puede realizarse mediante expertos con suficiente experiencia y cualificación, siguiendo una metodología establecida.

Realizar una inspección y evaluación regular del pavimento es crucial para detectar y entender las fallas que se presentan con facilidad y prontitud en el tiempo. La definición de secciones uniformes y los diferentes tipos de fallas, junto con la información sobre las propiedades geotécnicas de los materiales que conforman las distintas capas del pavimento, así como el conocimiento del comportamiento estructural en su totalidad, permitirán al ingeniero tomar decisiones fundamentadas y racionales sobre las tareas de conservación y mejora necesarias para prolongar la vida útil del pavimento al menor costo posible.

En Colombia, particularmente, se siguen unos pasos establecidos en la Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras (INVIAS, 2008), definiendo una primera etapa de Recolección de Información, cuyo propósito es suministrar información cualitativa para determinar las causas del deterioro del pavimento y desarrollar alternativas adecuadas para reparar los daños y prevenir su recurrencia, además de proveer información relativa al diseño y características funcionales.

El inventario de los daños visibles es el primer paso para evaluar la condición de un pavimento. La identificación de los diferentes tipos de deterioros en los pavimentos asfálticos se basa en tres factores: el tipo de deterioro, su causa primaria y su relación con el comportamiento estructural del pavimento. Los deterioros se agrupan en categorías según su origen, ya sea el tránsito, las condiciones climáticas, los materiales o el proceso de construcción.

Se debe tener en cuenta si, los deterioros son funcionales o estructurales. Los deterioros estructurales son defectos en la superficie del pavimento que resultan de la degradación de una o más capas constitutivas de la calzada. Estos deterioros indican que la estructura del pavimento ha superado o está cerca de superar su vida útil en las áreas afectadas. Por otro lado, los deterioros funcionales están relacionados principalmente con la capa asfáltica superficial y no afectan directamente el comportamiento estructural del pavimento. Sin embargo, estos deterioros obstaculizan la función prevista del pavimento, causando peligros o molestias a los usuarios.

La gestión de pavimentos ofrece una solución eficiente y rentable basada en principios de ingeniería y teoría económica. Los sistemas de gestión de mantenimiento de pavimentos (SGMP) son una parte integral de este enfoque y comprenden una evaluación del estado actual del pavimento, la predicción de las condiciones futuras, un análisis de alternativas y la determinación de la estrategia de rehabilitación adecuada. Adicionalmente, se debe considerar la gravedad o nivel

de severidad del deterioro y su extensión, es decir, la proporción del tramo evaluado que es afectado en términos de longitud o área. Cualquier procedimiento de inspección debe valorar los aspectos mencionados, sin embargo, no existe un criterio universal (INVIAS, 2008).

En general, en Colombia el método de auscultamiento visual sigue siendo la técnica predominante (INVIAS, 2008), ya sea manual o automatizada. Los datos recopilados sobre la condición del pavimento deben ser resumidos de manera precisa, preferiblemente mediante esquemas de itinerario. Estos esquemas permiten mostrar de forma clara los deterioros, su extensión y gravedad, junto con otros datos relevantes como deflexiones, rugosidad, drenaje y perfil del pavimento, proporcionando una visión completa y rápida de la condición de la calzada inspeccionada.

La evaluación de la condición superficial del pavimento se amplía mediante la combinación de los deterioros en índices que representan la condición global de la superficie. Estos índices brindan pautas para la elección de estrategias de mantenimiento o rehabilitación. El método VIZIR, utilizado en la guía metodológica del INVIAS, es simple y distingue entre deterioros estructurales y funcionales. Aunque existen otras metodologías, el sistema VIZIR ha sido exitoso en la evaluación de pavimentos asfálticos en países en desarrollo en zonas tropicales y se considera la herramienta más representativa (Andrade et al., 2020), (Sierra-Díaz & Rivas-Quintero, 2016).

En la actualidad, en Colombia se emplean tecnologías avanzadas en los sistemas de gestión de pavimentos, los cuales brindan resultados precisos sobre la condición de las carreteras. Esto permite desarrollar planes de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción en base a un período de análisis establecido. Estas tecnologías son utilizadas por diversas empresas consultoras especializadas en pavimentos (Alfonso-Barrera, 2019). Estas herramientas incluyen el uso de tecnología láser, radar, cámaras de alta definición y software avanzado de análisis de datos (González Fernández et al., 2019).

Una línea divisoria entre las herramientas consideradas tradicionales y las tecnologías emergentes podría ser la capacidad de medición y evaluación del estado del pavimento (Benavides Arbulú, 2020). Según el estudio citado, las herramientas tradicionales se centran en la medición de la superficie del pavimento y en la identificación visual de las fallas, mientras que las herramientas tecnológicas emergentes se centran en la evaluación de la estructura del pavimento, la identificación de las causas de las fallas y la predicción del rendimiento futuro.

En cuanto al panorama general, la evaluación del pavimento ha evolucionado significativamente en las últimas décadas gracias a la incorporación de tecnología avanzada. Esto ha permitido una evaluación más precisa y detallada del estado del pavimento, lo que a su vez ha llevado a la implementación de programas de mantenimiento y reparación más efectivos y eficientes (Castro Chuyo et al., 2021). Sin embargo, aún existen retos y desafíos a superar en la implementación de estas herramientas tecnológicas, como su costo y la capacitación del personal encargado de su uso. En general, se espera que la evaluación del pavimento siga evolucionando con el tiempo, permitiendo una gestión más efectiva y sostenible de las carreteras asfálticas.

El presente estudio, se basa en un análisis cualitativo-documental, cuyo objetivo es identificar las principales contribuciones de la tecnología en cuanto a la evaluación de pavimentos flexibles. A través de una revisión bibliográfica exhaustiva se realiza una búsqueda sistemática de las metodologías tradicionales y las tecnologías emergentes para la evaluación de la calidad de los pavimentos flexibles. Esta revisión debe incluir fuentes confiables y actualizadas, como artículos científicos, informes técnicos, tesis y libros especializados. Posteriormente, se definen los criterios de selección que permitan comparar las metodologías tradicionales y las emergentes teniendo en cuenta las principales variables tales como, precisión, eficiencia, confiabilidad, costo y facilidad de uso. Más adelante, mediante un análisis comparativo se identifican fortalezas y debilidades, así como las oportunidades de mejora. Finalmente, con base en los resultados se elaboran las conclusiones que den luz sobre cuál de las metodologías es la más adecuada para la evaluación de los pavimentos flexibles respaldado con argumentos sólidos y sustentados en los criterios de evaluación seleccionados.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las carreteras son una de las infraestructuras más importantes para el desarrollo de la economía y las actividades sociales de una nación, conectando una ciudad con otra, así como pueblos y aldeas. Permiten, además, el acceso a zonas con potencial turístico, industrial y agropecuario. La falta de mantenimiento en las vías de Colombia ha tenido consecuencias significativas, como el deterioro acelerado del pavimento, el aumento de los costos de reparación, riesgos para la seguridad vial, impacto negativo en la economía y calidad de vida de las personas (Espinosa-

Rodríguez, 2009). Esto se traduce en carreteras en mal estado, con baches y grietas, que dificultan la movilidad, generan accidentes y daños a los vehículos, afectan el comercio y el desarrollo regional, y causan incomodidades y molestias a los usuarios (Gadha Gilang Kencana et al., 2018).

Con el objetivo de dar respuesta a este problema, los países han desarrollado planes de mantenimiento de las carreteras, empleando diversas metodologías de auscultación de daños en los pavimentos. Las herramientas disponibles para este propósito, contemplan un amplio rango de técnicas y procedimientos, que van desde la inspección visual hasta el uso de drones, imágenes satelitales, entre otros. En general, dichas tecnologías se pueden clasificar en tradicionales y nuevas, no estando claro el punto de división entre ellas. No obstante, a lo largo de este documento, se dará luz sobre este aspecto.

En Colombia, existen tanto tecnologías tradicionales como nuevas tecnologías para la evaluación de daño superficial en pavimentos flexibles.

Las tecnologías tradicionales incluyen métodos visuales y manuales de inspección, como el uso de inspectores capacitados para identificar y registrar los tipos de deterioro presentes en el pavimento. Estos métodos pueden ser subjetivos y dependen en gran medida de la experiencia del inspector, lo que puede llevar a cierta variabilidad en los resultados. Además, requieren un tiempo considerable y pueden ser costosos en términos de mano de obra.

Por otro lado, las nuevas tecnologías de evaluación de daño superficial en pavimentos flexibles en Colombia han introducido métodos más avanzados y objetivos. Estos incluyen el uso de equipos de auscultación de pavimentos, como escáneres láser, cámaras de alta resolución y sistemas de evaluación automática. Estas tecnologías permiten una recopilación de datos más precisa y eficiente, reduciendo la necesidad de inspecciones manuales extensas y disminuyendo el tiempo y los costos asociados.

Además, las nuevas tecnologías permiten una mayor capacidad de análisis y procesamiento de datos, lo que facilita la identificación de patrones de daño, la generación de informes detallados y la toma de decisiones más informadas en cuanto a los programas de mantenimiento y rehabilitación.

El problema reside en que en Colombia aún se utilizan principalmente tecnologías tradicionales para evaluar el daño superficial en pavimentos flexibles, lo que puede resultar en limitaciones y

desafíos en términos de precisión, eficiencia y toma de decisiones informadas. Estas tecnologías dependen en gran medida de la inspección visual y manual, lo que puede generar subjetividad, variabilidad en los resultados y altos costos en términos de mano de obra y tiempo.

Además, el uso de tecnologías tradicionales puede dificultar la recopilación de datos a gran escala y la generación de informes detallados, lo que limita la capacidad de análisis y la identificación de patrones de daño. Esto puede llevar a una falta de conocimiento preciso sobre la condición de los pavimentos y dificultades para establecer programas de mantenimiento y rehabilitación efectivos.

Por lo tanto, es necesario fomentar la adopción de nuevas tecnologías de evaluación de daño superficial en pavimentos flexibles en Colombia. Estas tecnologías más avanzadas, como escáneres láser, cámaras de alta resolución y sistemas de evaluación automática, ofrecen ventajas significativas en términos de precisión, eficiencia y capacidad de análisis de datos. Su implementación permitiría una evaluación más precisa y objetiva de los pavimentos, facilitando la toma de decisiones informadas para el mantenimiento y rehabilitación, y mejorando la calidad y durabilidad de las vías en el país. Por tanto, surge la necesidad de conocer las ventajas y desventajas que ofrece cada tecnología para llevar a cabo estas actividades. Con este propósito, se formula la siguiente pregunta de investigación:

2.1 Pregunta de investigación

¿Hasta qué punto somos conocedores y en qué estado actual se encuentran los aportes más significativos y las debilidades que tienen las nuevas tecnologías en comparación de las usadas tradicionalmente para evaluar la calidad de los pavimentos flexibles?

2.2 Objetivo General

Realizar un informe sobre el estado actual en el que se encuentran las nuevas tecnologías para la evaluación de la calidad de los pavimentos flexibles con respecto las metodologías tradicionales.

2.3 Objetivos Específicos

- Caracterizar las metodologías tecnológicas y convencionales usadas actualmente para la evaluación de la calidad del pavimento flexible.
- Definir ventajas y desventajas de cada metodología (convencional y tecnológica).
- Presentar aplicaciones en el uso comparativo de cada metodología.



3 JUSTIFICACIÓN

La investigación se justifica debido a la importancia de caracterizar adecuadamente las fallas en los pavimentos para determinar estrategias óptimas de mantenimiento de carreteras. El método tradicional de evaluación visual subjetiva presenta diversas limitaciones, como altos costos, largos tiempos de encuesta y resultados poco confiables e inconsistentes. Además, expone a los inspectores a condiciones peligrosas de trabajo en las vías.

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado dispositivos automatizados que permiten adquirir y detectar defectos en el pavimento de manera objetiva y precisa. Estos métodos innovadores proporcionan datos no subjetivos, altamente productivos y precisos, lo que facilita el análisis cuantitativo del estado del pavimento.

El objetivo general de esta investigación es proporcionar un marco simple y efectivo para la gestión de carreteras. Al integrar el enfoque clásico de análisis de la condición del pavimento con el alto rendimiento de las nuevas tecnologías, se puede seleccionar el mejor método de detección de daños en el pavimento.

En primer lugar, se busca establecer criterios claros y simples para realizar un análisis de la condición del pavimento, enfocados en la comodidad y seguridad de los usuarios de la carretera. Se clasifican los daños según índices de evaluación de fallas en el pavimento, considerando su influencia en la seguridad y comodidad del usuario. Estos criterios se definen a través de una revisión bibliográfica especializada en pavimentos flexibles, lo que permite determinar umbrales geométricos o estados del pavimento que afectan las condiciones de conducción en términos de seguridad y comodidad.

Destacando la utilidad de estas herramientas dentro de un Sistema de Gestión de Pavimentos, surge la necesidad de identificar sus aportes y limitaciones en la evaluación del estado actual del pavimento. Por lo tanto, la comparación entre las metodologías nuevas y las convencionales permitirá determinar cuál es la metodología más pertinente o la combinación adecuada de ambas para realizar una evaluación de la condición de los pavimentos asfálticos.

Ampliando la información, un aspecto importante a considerar para la programación de mantenimientos en la red vial es la edad del pavimento. La edad en la que se realizan los mantenimientos de pavimentos flexibles en Colombia puede variar dependiendo de varios factores,

como el tipo de vía, el volumen de tráfico, las condiciones climáticas y el nivel de deterioro del pavimento. En general, los mantenimientos preventivos y rutinarios suelen llevarse a cabo a intervalos regulares, que pueden oscilar entre 3 y 7 años, dependiendo de la ubicación y las características de la vía. Estos mantenimientos tienen como objetivo preservar la calidad y funcionalidad del pavimento, evitando que los daños se conviertan en problemas más graves y costosos de reparar (INVIAS, 2016), (Escobar-Rojas et al., 2010).

Es importante destacar que cada entidad responsable de la gestión vial en Colombia, como el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) o las autoridades locales, puede establecer sus propias pautas y criterios para la programación y realización de los mantenimientos en función de las condiciones específicas de cada vía.

El INVIAS es la entidad encargada de la planificación, construcción, mantenimiento y administración de la red vial nacional. INVIAS presenta datos sobre los mantenimientos realizados en diferentes categorías de carreteras, que incluyen pavimentos flexibles. Estos datos suelen incluir información sobre los tipos de mantenimiento realizados, como mantenimiento rutinario, periódico o preventivo, así como los resultados obtenidos, los costos asociados y los criterios utilizados para la programación de los trabajos de mantenimiento.

Además, INVIAS puede proporcionar datos sobre el estado de la red vial en términos de condición del pavimento, nivel de deterioro, índices de evaluación y otros parámetros relevantes. Estos datos son fundamentales para tomar decisiones informadas sobre los planes de mantenimiento, asignación de recursos y mejora de la infraestructura vial en el país.

El INVIAS ha implementado una metodología para evaluar la condición de las vías incluidas en el programa de Corredores de Mantenimiento Integral. Esta metodología combina tres variables principales: el índice de deterioro superficial (IS), el valor del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Número Estructural Efectivo, calculado a partir de las deflexiones del pavimento.

La combinación de estas variables permite obtener una calificación de la condición del pavimento, centrándose exclusivamente en el estado de la superficie de la vía. El índice de deterioro superficial se determina a partir de los daños de tipo A de la metodología VIZIR, que son aquellos relacionados con el deterioro de la capa de rodadura (INVIAS, 2022).

El valor del IRI proporciona información sobre la rugosidad del pavimento, mientras que el Número Estructural Efectivo se calcula a partir de las deflexiones del pavimento, lo cual brinda datos sobre su capacidad estructural.

Mediante la combinación de estos tres indicadores, se obtiene una calificación que refleja la condición del pavimento de manera integral. Es importante destacar que esta metodología se enfoca exclusivamente en el pavimento y no considera otros elementos de la vía, como la señalización, el drenaje o las zonas laterales.

Después de haber obtenido la calificación final de cada sección, se lleva a cabo la determinación del estado de acuerdo con la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 3.1. Clasificación del estado de la vía según INVIAS

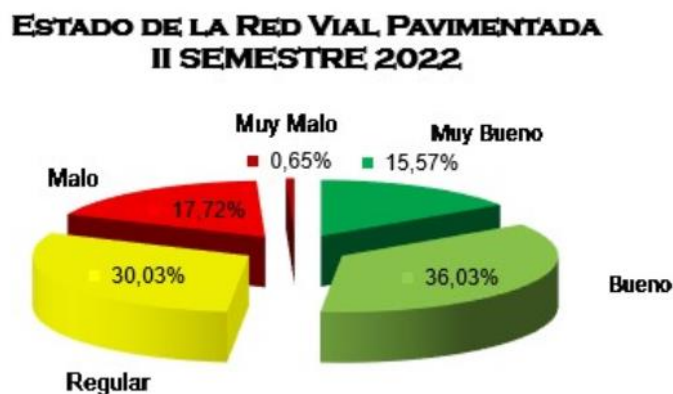
Calificación de la Sección	Estado de la Sección	Posible Tipo de Intervención
De 0.0 a 2.0	MUY MALO	Reconstrucción
De 2.0 a 3.5	MALO	Rehabilitación
De 3.5 a 4.0	REGULAR	Refuerzo – Mantenimiento Rutinario
De 4.0 a 4.5	BUENO	Mantenimiento Rutinario y Recurrente
De 4.5 a 5.0	MUY BUENO	Mantenimiento Rutinario

Fuente: (INVIAS, 2022)

Según datos emitidos por el INVIAS, el 18.37 % de las vías pavimentadas a su cargo, se encontraban en un estado Malo o Muy Malo, según se observa en la Figura 3.1.

UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

Figura 3.1 . Estado de la Red Vial Pavimentada en 2022



Fuente: (INVIAS, 2022)

Finalmente, la investigación propuesta es importante por varias razones. En primer lugar, la caracterización adecuada de las fallas en los pavimentos es fundamental para determinar las estrategias óptimas de mantenimiento de carreteras. Esto permite tomar decisiones informadas sobre los tipos de intervención necesarios, los momentos oportunos para realizar el mantenimiento y los recursos requeridos. Al mejorar la precisión y confiabilidad de la evaluación de la condición del pavimento, se pueden optimizar los recursos disponibles y garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios de la vía. Además, al integrar nuevas tecnologías de evaluación de daño superficial en pavimentos flexibles, se pueden obtener datos objetivos, precisos y eficientes. Esto facilita el análisis cuantitativo del estado del pavimento, lo que a su vez contribuye a una toma de decisiones más fundamentada y eficaz en cuanto a los planes de mantenimiento.

UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

4 ANTECEDENTES

La identificación y cuantificación de la degradación del pavimento en términos de tipo, gravedad y extensión son los primeros pasos para una evaluación de la metodología a seguir para el mantenimiento de las carreteras. Esta fase es a menudo crucial debido a la falta de estandarización de dicho desgaste, lo que podría llevar a la inconsistencia en la clasificación (Ragnoli et al., 2018). En la literatura, existen varias guías y catálogos para identificar la degradación desarrollados por diferentes investigadores y organizaciones (Miller & Bellinger, 2014), (Shahin, 2005), quienes adoptan criterios de identificación y evaluación muy similares.

Una de las referencias más difundidas y conocidas es la (ASTM D6433-18, 2018), que proporciona la identificación y clasificación de criterios de degradación tanto para pavimentos flexibles como para rígidos. Otra referencia muy utilizada es el manual del Programa de Rendimiento de Pavimentos a Largo Plazo del Departamento de Transporte de los Estados Unidos (Miller & Bellinger, 2014), cuyo objetivo es recopilar datos de rendimiento del pavimento en los Estados Unidos y Canadá. Esta clasificación es relevante debido a su amplia experiencia, pero no provee ningún rango numérico para determinar el grado de daño en el pavimento (Coenen & Golroo, 2017). Según (Ragnoli et al., 2018), el antecedente europeo en la identificación y gestión de problemas en pavimentos está limitado a algunos casos aislados. En realidad, solo el Instituto Francés de Ciencia y Tecnología del Transporte (LPCC, 1998) y la Asociación Suiza de Profesionales de la Carretera y el Transporte (GEC, 2003), han desarrollado un enfoque sistemático en la identificación de problemas de pavimentos en sus directrices, mientras que solo recientemente Irlanda ha incluido la evaluación del pavimento de la carretera que se basa solo en la evaluación de la condición de la superficie (Tech Transportation Institute et al., 2015). En Italia, la difusión de procedimientos estándar para la identificación de problemas en pavimentos es escasa y se limita a las directrices del Consejo Nacional de Investigación y casos aislados de aplicación por parte de oficiales de carreteras (Istruzioni Sulla Pianificazione Della Manutenzione Stradale, 1988).

Uno de los más difundidos criterios es el Índice de Condición de Pavimento (PCI), desarrollado en los Estados Unidos (Andrade et al., 2020), (ASTM D6433-18, 2018), proporciona clasificación numérica que abarca desde cero (0), que indica un pavimento en mal estado, hasta cien (100), que

representa un pavimento en condiciones óptimas. La clasificación se realiza de acuerdo a los valores establecidos en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Rangos de clasificación del PCI.

Rango	Clasificación
100 – 85	Excelente
85 – 70	Muy Bueno
70 – 55	Bueno
55 – 40	Regular
40 – 25	Malo
25 – 10	Muy Malo
10 – 0	Fallado

Fuente: (Andrade et al., 2020, p. 35)

Colombia, no es ajena a la necesidad de evaluar efectivamente la condición de sus redes viales. A pesar de que en los últimos años se ha multiplicado la inversión en la infraestructura, la calidad de las vías es deficiente según el Índice PCI y solo es comparable con países como Bolivia, Zambia, Camerún y Zimbabue (Real & Montaña, 2021). La evaluación del deterioro de las carreteras se lleva a cabo mediante inspecciones visuales y registros manuales (Tello-Cifuentes et al., 2021). El INVIAS, por su parte, utiliza dos métodos para evaluar el estado de las vías, el VIZIR (Visión Inspection de Zones et Itinéraires Á Risque) y PCI (Paviment Condition Index), que permiten determinar el grado de daño en los pavimentos flexibles y rígidos. Aunque estos métodos son beneficiosos, pueden resultar monótonos y subjetivos, además, necesitan de la destreza de un especialista, lo que resalta la necesidad de desarrollar nuevas técnicas para evaluar el estado de las vías. En ese orden de ideas, una fuente de obligatoria consulta para la inspección visual es el Manual de Inspección Visual para Pavimentos Flexibles (INVIAS & Universidad Nacional de Colombia, 2006), que consta de una recopilación bibliográfica y experiencia acumulada en el desarrollo del Convenio 587 de 2003, entre la Universidad Nacional de Colombia y el INVIAS, con respecto a la inspección y al reporte de los daños que se pueden encontrar en pavimentos flexibles. El manual proporciona herramientas prácticas para los ingenieros. Estas herramientas son utilizadas durante la inspección visual de los pavimentos y permiten generar un informe

detallado sobre los daños encontrados. El objetivo es identificar el tipo, la magnitud y la severidad de los daños, así como su ubicación precisa en la vía y los sectores que presentan mayores afectaciones. El manual proporciona una guía clara y estructurada para llevar a cabo esta tarea, lo que facilita la recopilación de datos y la generación de informes precisos sobre el estado de los pavimentos flexibles.

En la preparación de un sistema de gestión de mantenimiento de carreteras, se requiere un inventario de datos que contenga como mínimo las condiciones de daño, la clase, geometría y ubicación de la carretera. Los datos contenidos en este inventario son variables y parámetros importantes que se pueden recopilar, compilar y procesar en un sistema de base de datos que funcione como formulario de entrada, procesamiento y presentación de datos, junto con recomendaciones para proporcionar opciones de implementación de mantenimiento como una de las herramientas de apoyo para los tomadores de decisiones (Al-Neami et al., 2018).

Según (Instituto de Desarrollo Urbano IDU & INVIAS, 2021), en Bogotá se llevan a cabo trabajos de mantenimiento vial, los cuales están alineados con las tecnologías y recursos disponibles en la ciudad. Estas labores son dirigidas por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y se basan en los rangos de condición del pavimento establecidos por la metodología PCI. Según el informe técnico del IDU (Ver Tabla 4.2), los pavimentos clasificados dentro de los rangos de 56 a 100 (códigos verde y amarillo) presentan capacidades estructurales buenas o aceptables, por lo que requieren actividades de mantenimiento rutinario y periódico. Los pavimentos ubicados en el rango de 26 a 55 (código naranja) muestran signos de deterioro superficial y cierto grado de deterioro estructural, por lo que requieren intervenciones de rehabilitación. Por último, los pavimentos con un rango inferior a 25 se consideran tramos en estado crítico y requieren la reconstrucción completa de la vía. La diferencia clave entre las actividades de mantenimiento periódico y las rehabilitaciones radica en que estas últimas implican la intervención en las capas granulares de la estructura del pavimento, lo que requiere diseños de espesores adecuados al tráfico, evaluaciones de la capacidad de soporte de la subrasante, análisis de costos (que suelen ser mayores que las labores de mantenimiento) y tiempos de ejecución más prolongados (Espinosa-Rodríguez, 2009).

Tabla 4.2. Clasificación de las actividades de acuerdo al rango PCI

--RANGO--	--CODIGO--	-TIPO DE INTERVENCION-
100 – 86	VERDE	Mantenimiento rutinario
85 - 56	AMARILLO	Mantenimiento periódico
55 – 26	NARANJA	Rehabilitación
25 - 0	ROJO	Reconstrucción

Fuente: (Espinosa-Rodríguez, 2009, p. 48)

El objetivo común de todos los catálogos de problemas mencionados anteriormente es proporcionar un conjunto de criterios común "tan objetivo como sea posible" para evaluar la condición del pavimento y definir estrategias de gestión (Ragnoli et al., 2018). De hecho, casi todos los métodos para realizar un Sistema de Gestión de Pavimentos se basan en el desarrollo de índices de condición del pavimento para expresar el rendimiento estructural y operativo, combinando diferentes tipos de problemas expresados en términos de gravedad y extensión, como el Índice de Condición del Pavimento (PCI) (Miller & Bellinger, 2014), (ASTM D6433-18, 2018). Para llevar a cabo un enfoque de mantenimiento preventivo para toda una red de carreteras, se requiere disponer de información detallada sobre las condiciones reales de la carretera. Esto solo se puede obtener mediante una identificación y clasificación precisa de las fallas. Por otro lado, para alcanzar información de alto nivel, son necesarias grandes inversiones en tecnologías y personal calificado.

En los últimos años, impulsados por el desafiante objetivo de la UE en materia de seguridad vial, muchos investigadores y agencias públicas han dedicado sus energías y recursos a investigar el papel de la condición de la carretera en los fenómenos incidentales (Coenen & Golroo, 2017), (Loprencipe & Pantuso, 2017), (Shah et al., 2013), (Tighe et al., 2000). Además, debido a la falta de recursos económicos, muchos países tienen que enfrentarse a la imposibilidad de invertir en sofisticados Sistemas de Gestión de Pavimentos y costosas encuestas extensas. A partir de estas consideraciones, surge la efectividad de una herramienta de clasificación de pavimentos. Un conjunto definido de información adquirida por encuestas enfocadas (Bennett et al., 2006), (Loprencipe et al., 2017), puede proporcionar una herramienta orientada a la seguridad y la comodidad.

Los sistemas más recientes están compuestos por uno o varios dispositivos de adquisición y aplicaciones de post-procesamiento para procedimientos de extracción de datos semiautomáticos o automáticos, basados en algoritmos de visión artificial y procesamiento de imágenes (Mathavan et al., 2015). Sin embargo, debido a las irregularidades de la superficie del pavimento y a la presencia miscelánea de defectos en la superficie, ha habido un éxito limitado en la detección y clasificación precisa de grietas automatizadas, lo que ha limitado la adopción masiva de este tipo de sistema (Oliveira & Correia, 2013). Mientras que el uso de encuestas automatizadas de condición del pavimento se está volviendo cada vez más común, muchas agencias todavía dependen de métodos manuales para proporcionar sus datos de condición del pavimento. No hay duda de que las encuestas automatizadas de condición del pavimento son más eficientes y seguras que las encuestas manuales de condición del pavimento; sin embargo, la calidad de los datos de la encuesta automatizada ha sido objeto de gran escepticismo desde su concepción. Varios estudios (Oliveira & Correia, 2014), (Zakeri et al., 2017), han demostrado que, en la mayoría de los casos, los resultados de los dos procedimientos son estadísticamente similares: la presencia masiva de irregularidades puede producir una detección, clasificación y cuantificación incorrecta, especialmente cuando las irregularidades se encuentran en la misma porción de la superficie (Zakeri et al., 2017). El tipo, la gravedad y la extensión de los defectos del pavimento son las claves para evaluar las condiciones del pavimento, e incluso para determinar las soluciones técnicas de encuesta más adecuadas.

En su estudio (Ragnoli et al., 2018) intenta presentar las prácticas actuales y tecnologías emergentes para la adquisición de datos, considerándolas en relación con las necesidades de información de un Sistema de Gestión de Pavimentos (PMS) orientado a la seguridad y la comodidad. Para satisfacer las necesidades de información emergentes de las agencias administradoras de vías que participan en la realización de un sistema de gestión de pavimentos, los vehículos utilizados para las encuestas se encuentran en una plataforma multisensores: generalmente proporcionan información georreferenciada utilizando un sistema de posicionamiento basado en GPS, integrado con los datos de la cámara, láser y otros sensores, para describir el entorno de la carretera. Con el fin de proporcionar una clasificación de las tecnologías de detección disponibles para la adquisición de datos de un sistema de gestión de pavimentos, se han considerado los siguientes criterios: precisión, que indica la variabilidad estadística; exactitud, que indica el error sistemático como causa de la diferencia con el valor real; resolución espacial,

que indica el cambio más pequeño que puede detectar; productividad, que indica la tasa de producción en el tiempo; costo de implementación; y automatización, facilidad de integración en un proceso automatizado.

Con el mismo objetivo, en su investigación (Benavides Arbulú, 2020), realizó una revisión bibliográfica sobre las tecnologías para evaluación de pavimentos flexibles. La metodología aplicada se rigió bajo un análisis cualitativo documental, inicialmente se revisaron artículos de revista asociados a la temática publicados recientemente. En ellos se identificaron las tecnologías usadas para la evaluación de pavimentos asfálticos. Encontrando que la tecnología ha evolucionado en gran medida, iniciando desde metodologías de auscultamiento, pasando por bases de datos maestros, siguiendo por hardware y software de evaluación de la superficie, que evalúa y predice probabilísticamente la ocurrencia de patologías, así como cuál es la forma más adecuada para realizar los procedimientos preventivos y correctivos en el mantenimiento.

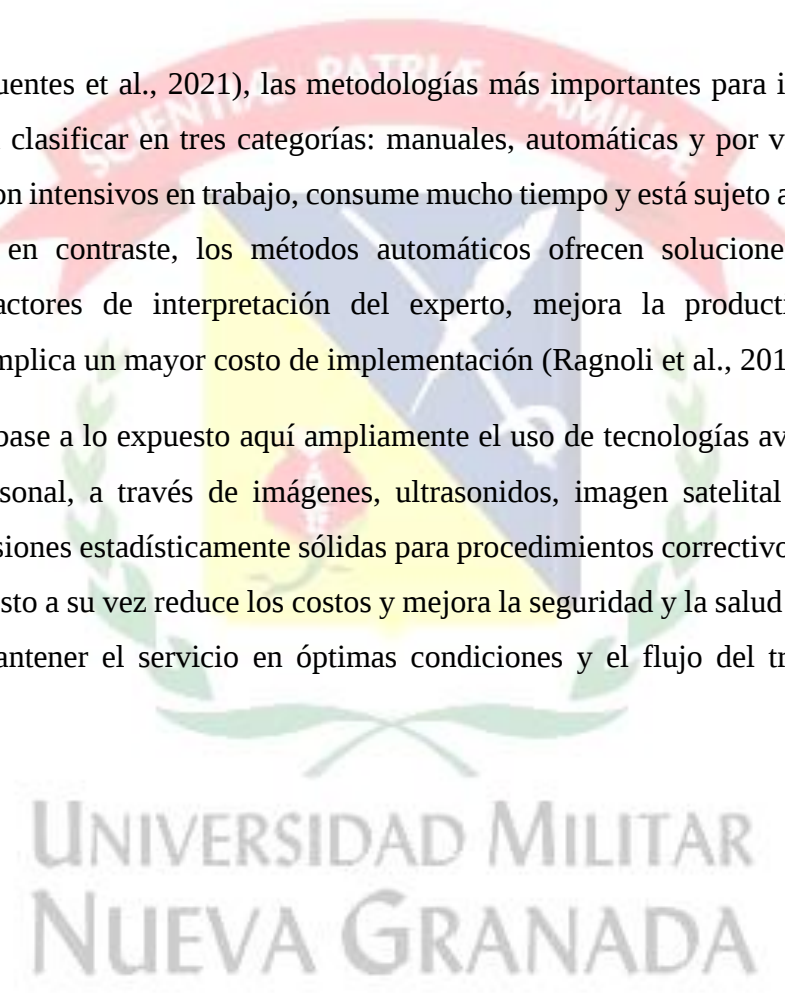
Por otra parte, en cuanto los modelos predictivos, en su artículo publicado en la revista Hindawi (Shtayat et al., 2022), realiza una descripción general de los modelos de predicción de la degradación del pavimento. Realizando un resumen de sistemático de los modelos de predicción de rendimiento existentes para establecer la condición de degradación del pavimento asfáltico utilizando índices de condición de pavimento (PCI) y el índice de rugosidad internacional (IRI).

En su disertación para la Universidad de Riga en Lituania, (Kravcovas et al., 2020), identificaron los indicadores de desempeño y sugirieron una metodología para el establecimiento de la condición del pavimento de las vías urbanas en Vilnius capital de Lituania. Para lograr dicho objetivo, se midieron las fallas (profundidad de ahuellamiento y grietas), capacidad portante e índice internacional de rugosidad (IRI) para quince vías urbanas en servicio en un período de dos años. Las fallas, la profundidad de la rodera y el IRI se recolectaron con el Road Surface Tester (RST) y la capacidad de carga de las estructuras del pavimento se midieron con un Deflectómetro de caída de peso (FWD). De acuerdo con los datos medidos, se determinaron los índices combinados de condición del pavimento utilizando dos metodologías, así como un índice de condición global para cada vía. Los caminos analizados fueron priorizados para mantenimiento y rehabilitación con respecto a estos criterios. Con base en los hallazgos de la investigación, se destacaron las recomendaciones para un mayor monitoreo de la condición del pavimento y la implementación del modelo de desempeño del pavimento para el SGP.

Como complemento, en su investigación (Macea-Mercado et al., 2016), explica cómo la ciencia y la tecnología han permitido desarrollar soluciones más precisas para resolver los problemas de la sociedad moderna. Se propone la implementación de un sistema que facilite la gestión de pavimentos en países en vías de desarrollo, utilizando tecnologías modernas que permiten la toma y análisis de información de manera más eficiente. Este sistema consiste en un vehículo equipado con herramientas para registrar y localizar daños en los pavimentos, y producir mapas de deterioro vial que se pueden utilizar para tomar decisiones sobre políticas de inversión en infraestructura vial.

Según (Tello-Cifuentes et al., 2021), las metodologías más importantes para inspeccionar las carreteras se pueden clasificar en tres categorías: manuales, automáticas y por vibraciones. Los métodos manuales son intensivos en trabajo, consume mucho tiempo y está sujeto a la subjetividad de los inspectores; en contraste, los métodos automáticos ofrecen soluciones de detección minimizando los factores de interpretación del experto, mejora la productividad, aunque comparativamente implica un mayor costo de implementación (Ragnoli et al., 2018).

En general, y en base a lo expuesto aquí ampliamente el uso de tecnologías avanzadas reduce la actividad del personal, a través de imágenes, ultrasonidos, imagen satelital e infrarroja, y permiten tomar decisiones estadísticamente sólidas para procedimientos correctivos y preventivos de mantenimiento. Esto a su vez reduce los costos y mejora la seguridad y la salud de los peatones y conductores al mantener el servicio en óptimas condiciones y el flujo del tráfico estable y continuo.



UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

5 MARCO DE REFERENCIA TEÓRICO

5.1 ¿Qué es un pavimento?

Es el conjunto de capas también llamada capa, con una composición específica, que se encuentra desde la base de la estructura o la subrasante y finaliza en la capa de rodadura. Su principal objetivo es brindar al conductor una superficie uniforme y disminuir el ruido al interior del vehículo. El pavimento deberá de tener las propiedades adecuadas, soportar el efecto del medio ambiente, soportar el tránsito, además de trasferir adecuadamente las cargas a la subrasante (Montejo Fonseca, 1998).

5.2 Pavimento asfáltico

Existen diferentes tipos de pavimentos, entre los que se encuentran: el pavimento asfáltico, pavimento rígido y el pavimento articulado. El pavimento asfáltico se clasifica en dos grupos, los flexibles y los semirrígidos. Un pavimento flexible se caracteriza porque su estructura se flexiona dependiendo de acuerdo a las cargas que se ejercen sobre él. Son muchos los lugares donde se usan este tipo de estructuras, pero principalmente se encuentran en lugares de abundante tráfico (vías, aeropuertos, aceras o parkings). Aunque el periodo de vida útil está entre 10 y 15 años es un pavimento que requiere constante mantenimiento para prolongar su vida útil (González Fernández et al., 2019).

Las capas del pavimento asfáltico se componen de: subrasante, sub-base, base y carpeta asfáltica. Estas capas están sobre el sub suelo natural (Montejo Fonseca, 1998). En la Figura 5.1 se puede observar cada una de las capas.

Figura 5.1. Estructura del pavimento asfáltico



Fuente: Elaboración por el autor

Es una estructura conformada por la superposición de capas que distribuyen las cargas que llegan a la subrasante desde la superficie. La capa superficial está compuesta de concreto asfáltico (CA): mezcla de asfalto y agregados. En la Figura 5.2 se observa cómo están distribuidas las cargas en el pavimento flexible.

UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

Figura 5.2. Distribución de cargas en el pavimento asfáltico



Fuente: Elaboración por el autor

Los pavimentos a través del tiempo y el uso presentan deterioro, y esta se origina por diferentes causas, esas fallas pueden ser evaluadas de diferentes formas entre los que encontramos: metodologías tecnológicas o métodos convencionales.

Entre las convencionales se tomarán como las más utilizada en Colombia que corresponde a: INVIAS, Banco Mundial, norma ASTM D6433-07, VIZIR, PCI (Paviment Condition Index) y Cuerpo de Ingenieros Militares de Estados Unidos (PAVER) (García-Salazar & Silva-Castillo, 2018).

PAVER es una metodología desarrollada por los ingenieros militares de Estados Unidos. En esta metodología lo que se busca es medir de una manera más acertada, el porcentaje de área afectada y la gravedad de las fallas presentes en la parte superficial de pavimento. Todo esto, usando curvas que se obtiene de los pesos que se han asido asignados a cada una de ellas, y de esta manera poder representar daño del pavimento por medio del índice de fallas (ASTM D6433-07, 2008), (Pallasco-Catota, 2018) .

Ahora bien, VIZIR es un método de auscultamiento de origen francés. Su principal función es definir cuáles son las diferencias entre las fallas estructurales y las fallas funcionales. El

indicador que usa este método lo hace mediante el índice de deterioro superficial (IS), se calcula mediante el porcentaje vial de área afectada y la longitud del tramo de evaluación, es un valor adimensional. La escala que usa este indicador está dada por valores entre uno y siete, donde siete es el valor de más baja calificación y uno señala el perfecto estado de la estructura (García-Salazar & Silva-Castillo, 2018), (Villegas-Marín, 2020).

Por otra parte, el método PCI es una metodología desarrollada por el departamento de transporte de estados unidos y es utilizada para determinar los daños superficiales y estructurales de los pavimentos rígidos y flexibles, ya que por medio de su análisis determina las posibles causas que generaron el deterioro de este. (García-Salazar & Silva-Castillo, 2018)

5.3 Sistemas de gestión de pavimentos

Uno de los conceptos más esenciales en la gestión de activos de transporte es el del sistema de gestión de pavimentos (SGP) de la agencia. El concepto SGP comenzó en la década de 1960. Se define como “un conjunto de herramientas o métodos que ayudan a los tomadores de decisiones a encontrar estrategias óptimas para proporcionar y mantener pavimentos en condiciones de servicio durante un período determinado”. El concepto SGP evolucionó hasta su aplicación inicial en la década de 1970 (Abukhalil & Smadi, 2022).

Con el fin de mantener la red de carreteras, actualmente se utilizan muchos parámetros de condición del pavimento, incluido el índice de capacidad de servicio del pavimento (PSI) por su nombre en inglés Pavement Serviceability Index, el Índice de condición (PCI) por su nombre en inglés Pavement Condition Index y Calificación de capacidad de servicio del pavimento (CSP). Usando estos parámetros, la vida útil restante del pavimento (RSL) por su nombre en inglés, se puede estimar usando el modelo de deterioro del pavimento. El RSL del pavimento es una medida, en años, de cuándo se requiere la próxima rehabilitación importante, y el modelo de deterioro del pavimento presenta el deterioro del pavimento a lo largo de los años. Existen varios tipos de inspección, en el desarrollo de este marco teórico se revisarán algunos de ellos.

5.4 Inspección en tiempo real

(Sinha et al., 2017), afirmó que la inspección en tiempo real de las condiciones de las instalaciones es muy prometedora para la futura gestión de activos de pavimentos. El conocimiento preciso de las condiciones actuales y futuras del pavimento vial, logrado a través de la inspección

en tiempo real, ayuda a una agencia a planificar de manera eficiente los programas de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción (MRR) y a asignar adecuadamente los presupuestos limitados, con el objetivo final de minimizar los costos sociales, como como tiempo adicional de viaje, operación del vehículo y costos de seguridad para los usuarios, y costos futuros de MRR requeridos para la agencia. La condición actual medida se utiliza para la política de MRR basada en la condición, es decir, para sugerir una acción adecuada que coincida con una condición específica del pavimento en un entorno determinado. Además, el registro compilado de las mediciones del estado se puede utilizar para actualizar el modelo de predicción del deterioro del pavimento, una herramienta fundamental para establecer la planificación de la gestión a largo plazo (Shon et al., 2022).

5.5 Metodologías de evaluación

Las metodologías de evaluación como bien se conoce los pavimentos tienen como finalidad prestar un servicio adecuado, seguro y cómodo para el momento de conducir, además de esto el pavimento debe generar un nivel de servicio propicio a la demanda que solicita el lugar de su construcción.

La finalidad de la evaluación de los pavimentos consiste en crear un informe, el cual nos sirva de guía donde se den los diferentes diagnósticos del estado en el cual se presenta el pavimento destinado al estudio y análisis. La importancia de dar un buen diagnóstico sobre las anomalías encontradas en los pavimentos es que con una correcta información se puede adoptar las medidas correctas al momento de efectuar la reparación, mantenimiento y así mismo la rehabilitación. Con el objetivo de ampliar la vida útil del pavimento, por esta razón es de gran importancia que la evaluación se realice objetivamente y con un objetivo claro de la finalidad del pavimento.

Según la guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos en carreteras (INVIAS, 2013). se muestran las clases, tipos y causas origen de los deterioros de los pavimentos asfálticos, información inicial para establecer las estrategias de intervención, adicionalmente a continuación se anexan alguno de los deterioros más comunes (Tabla 5.1) en nuestra infraestructura nacional, así como la causa que los originaron (Andrade et al., 2020).

Tabla 5.1 Deterioros más comunes del pavimento

Daños en la mezcla asfáltica	Exudación Ahuellamiento Huecos Desprendimiento de agregados
Capas subyacentes	Abultamiento y hundimiento Corrugación Depresión Grietas de borde Desnivel Carril/Berma Grietas longitudinales y transversales Ahuellamiento Hinchamiento
Constructivos	Exudación Parcheo Huecos Desprendimiento de agregados
Deterioro de la carpeta asfáltica por cargas	Piel de Cocodrilo Grietas Longitudinales y transversales Pulimiento de agregados Huecos Desplazamiento Grietas parabólicas Desprendimiento de agregados
Deterioro de la carpeta asfáltica por clima	Agrietamiento en bloque Grietas de reflexión de clima

Fuente: (Andrade et al., 2020)

5.6 Tipos de falla del pavimento flexible

Los tipos de fallas que se encuentran en un pavimento flexible se pueden agrupar en tres grandes categorías:

- Daño superficial
- Grietas y fisuras
- Otros tipos de daños

Seguidamente se presenta la definición de cada uno de los daños además de cuáles pueden ser las causas que lo generaron, esto con su registro fotográfico que contextualiza mejor la forma de cada daño (Miranda-Rebolledo, 2010).

Según (Miller & Bellinger, 2014), (Shahin, 2005), (ASTM D6433-18, 2018), los tipos de daños se agrupan en cuatro familias, como se describe a continuación:

- Agrietamiento
- Deformación viscoplástica

- Defectos de superficie
- Otras fallas

El agrietamiento del pavimento incluye varios tipos de fallas, como agrietamiento por fatiga, agrietamientos en bloques, agrietamiento en los bordes, agrietamiento longitudinal y transversal y agrietamiento por reflexión. La mayoría están relacionados con causas climáticas, excepto el agrietamiento tipo cocodrilo, relacionado con la carga, y el agrietamiento de deslizamiento que es causado por el tráfico.

La deformación viscoplástica consiste en todas las deformaciones que afectan tanto las capas superficiales como las inferiores. La ondulación, la corrugación y la desviación del carril/berma generalmente implican un desplazamiento horizontal y vertical de la capa superior de la estructura del pavimento, mientras que las protuberancias y hundimientos, las depresiones, los baches y abultamientos pueden afectar toda la estructura. La carga es la primera causa de las deformaciones viscoplásticas, seguida de los efectos del tráfico y el clima.

Los defectos superficiales incluyen la exudación, el agregado pulido y el desprendimiento. Cuando se produce exudación, hay un exceso de aglutinante bituminoso en la superficie de la capa superior, mientras que en el caso de “raveling” que consiste en un desprendimiento progresivo de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el asfalto, un aglutinante asfáltico inadecuado puede causar el desalojo del agregado. En el caso del agregado pulido, la superficie de la capa superior se vuelve suave debido a la exposición del agregado al tráfico, lo que produce una reducción en la adherencia. Las causas de los defectos superficiales están relacionadas con las características de los materiales bituminosos y el efecto del tráfico.

5.7 Daño superficial

5.7.1 Parches en mal estado

Los parches se generan donde el pavimento inicial fue retirado se reemplazó por un material semejante, esto se usa para reparar la estructura hasta los granulares o hasta el nivel del pavimento asfáltico, también se usan para realizar la reparación o instalación de alguna red de servicio ver Figura 5.3. Algunas de las causas asociadas a este tipo de daños se derivan de un proceso constructivo deficiente y que solo se recubrió el lugar con el daño sin solucionar las causas de lo genero. Otra causa pudo haber sido deficiencia en las juntas, o causas directamente con el parche

que se usó, que sea insuficiente para el nivel de solicitudes y características de la subrasante002E

Figura 5.3. Deterioro superficial por parches deteriorados



Fuente: Elaboración por el autor

5.7.2 Baches y tratamientos superficiales.

Estas son formas redondas con forma de cavidad, generada por el desprendimiento de la mezcla asfáltica. Se considera como un bache si al menos una de sus dimensiones tiene como mínimo 150mm. Un bache se puede dar por la colocación de un pavimento estructuralmente insuficiente para el nivel de solicitudes y características de la subrasante ver Figura 5.4. Otra causa suele ser por drenajes insuficientes o inadecuados. Se ha documentado donde el derrame de solventes como bencina o aceite puede causar baches.

Figura 5.4. Deterioro superficial por baches



Fuente: Elaboración por el autor

5.7.3 Ahuellamientos.

Se identifica como un hundido o depresión en el lugar donde pasan las llantas de los vehículos. A esto se le agrega una elevación en las áreas adyacentes de la zona de fisuración y deprimida. Un ahuellamiento severo puede causar falla estructural y generar el hidro planeo debido al almacenamiento de agua ver Figura 5.5. La razón principal por la que se da el ahuellamiento es debido a la deformación permanente de una de las capas de la subrasante o de las capas del pavimento, debido a la deformación de la subrasante por la repetición de las cargas o la deformación plástica del pavimento.

UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

Figura 5.5. Deterioro superficial con ahuellamiento



Fuente: Elaboración por el autor

5.7.4 Deformación transversal.

Las grietas de desplazamiento se dan por la falta de adherencia entre la carpeta inferior y la carpeta de superficie. La poca adherencia puede darse por la presencia de aceite, polvo, agua o cualquier otro elemento adhesivo que este entre las dos carpetas. Comúnmente la falta de adherencia se genera cuando no se agregó un riego de liga. En algunas ocasiones la mala compactación provoca la rotura de la adherencia entre las dos carpetas ver Figura 5.6.

Figura 5.6. Deterioro superficial por deformación transversal



Fuente: Elaboración por el autor

5.7.5 Exudaciones

Las exudaciones se presentan como un afloramiento o película del ligante asfáltico sobre la superficie del pavimento generalmente resbaladiza, brillante y pegajosa. Esto es un proceso que en mayor escala puede afectar la resistencia al deslizamiento. Ver Figura 5.7. Lo que genera que una exudación se dé es cuando la mezcla tiene grandes de asfalto permitiendo que los contenidos de vacíos con aire de mezcla sean bajos, es mucho más común en zonas calientes. Otra razón es por el uso de asfaltos muy blandos o por derrame de algunos solventes.

Figura 5.7. Deterioro superficial por exudaciones



Fuente: Elaboración por el autor

5.7.6 Desgaste

Se ocasiona por el desgaste del pavimento originado principalmente por la acción del tránsito, de agentes erosivos o abrasivos. Se identifica como pérdida de mortero o ligante. Se común encontrarla en los lugares donde transitan los vehículos. Esta patología produce aceleración del daño del pavimento por efecto del tránsito y del medio ambiente. Ver Figura 5.8. El desgaste es algo propio del uso o el tiempo de elaboración del pavimento, generalmente es un deterioro natural. Para casos en los cuales la severidad de este daño, se da en edades tempranas puede estar asociado a un endurecimiento significativo del asfalto.

Figura 5.8. Deterioro superficial por desgaste



Fuente: Elaboración por el autor

5.7.7 Pérdida de áridos

Otro nombre por el cual se le conoce a este tipo de daños es desintegración, corresponde a la pérdida de áridos de la capa de rodadura a razón de la pérdida progresiva de agregados, produciendo una superficie más rugosa y exhibiendo de manera progresiva los materiales a los agentes climáticos y la acción del tránsito. Es común encontrar este tipo de daños cuando se han realizado tratamientos superficiales, donde también suelen aparecer estrías en la dirección del riego. Ver Figura 5.9. Dentro de las posibles causas están: haberse presentado lluvia durante la aplicación o fraguado del ligante asfáltico. Haber realizado una aplicación irregular del ligante en tratamientos superficiales.

Figura 5.9. Deterioro superficial por pérdida de áridos



Fuente: Elaboración por el autor

5.7.8 Ondulaciones

Se caracteriza por la presencia de ondas en la superficie del pavimento, este se da generalmente en forma perpendicular a la dirección del tránsito, con longitudes entre crestas que no sobrepasan a 1 m. La ondulación se da debido a una pérdida de estabilidad de la mezcla normalmente en climas cálidos por hacer una dosificación del asfalto, uso de agregados redondeados o ligantes blandos. Ver Figura 5.10.

Figura 5.10. Deterioro superficial por ondulaciones



Fuente: Elaboración por el autor

5.8 Fisuras y grietas

5.8.1 Fatigamiento.

Se muestran como un grupo de fisuras interconectadas con formas irregulares, están mayormente ubicadas en los lugares donde mayor repetición de cargas. Este tipo de daño tiende a iniciarse en el fondo de la capa asfáltica, en donde los esfuerzos de tracción son en su mayoría debido a la acción de las cargas, son llamadas comúnmente como piel de cocodrilo por su parecido con la piel de ese animal. Este tipo de fisuras y grietas no es usual en carpetas asfálticas puestas sobre pavimentos de hormigón. Ver Figura 5.11. Las causas asociadas a este tipo de daño son: por la fatiga de la estructura o de la carpeta asfáltica; por deformación de la subrasante o por el poco grosor de la estructura.

Figura 5.11. Fatigamiento

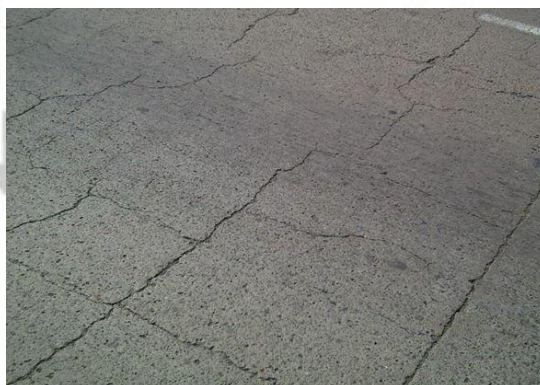


Fuente: Elaboración por el autor

5.8.2 Fisuras y grietas en bloque

Se identifica por la división de la superficie del asfalto en bloques con una estructura regular. Este tipo de daño es diferente del anterior descrito pues en este tipo de daño este aparece en zonas que sido sometidas a cargas, mientras que las formas rectangulares aparecen en zonas no cargadas. Se pueden encontrar fisuras en bloque que pasaron a piel de cocodrilo por el efecto del tránsito. Ver Figura 5.12. La causa principal por la cual apare este tipo de daño es por la retracción del pavimento asfaltico originado por los cambios de temperatura durante el día, esto produce ciclos de esfuerzo produciendo deformación sobre la mezcla.

Figura 5.12. Fisuras y grietas en bloque



Fuente: Elaboración por el autor

5.8.3 Grietas de borde.

Como su nombre lo dice son grietas que se dan al borde de la calzada principalmente de forma longitudinal. Estas se generan en su mayoría porque la estructura no tiene berma o porque existe una diferencia de nivel de la calzada y la berma. Estas grietas se ubican paralelas al borde de la línea límite del pavimento, con un ancho no mayor a 0.60 m². Ver Figura 5.13.

Figura 5.13. Grietas de borde



Fuente: Elaboración por el autor

5.8.4 Grietas transversales y longitudinales.

Estas se ubican en la misma dirección del tránsito o transversal a este. Este tipo de daño refleja un exceso en los esfuerzos de tensión en alguna de las capas de pavimento. La ubicación de las grietas dentro del carril puede explicar la causa que lo genere, esta ubicación muestra cuales son las zonas sujetas a cargas que son las relacionadas con la fatiga en toda la estructura. Ver Figura 5.14.

Figura 5.14. Grietas transversales y longitudinales



Fuente: Elaboración por el autor

5.8.5 Fisuras y grietas reflejadas.

La causa de este tipo de daño se da cuando una capa de pavimento asfáltico esta sobre placas de pavimento rígido; estas grietas o fisuras surgen por la proyección en superficie de las juntas sobre las placas. Ver Figura 5.15. Este tipo de daño no se produce por las cargas de tránsito, pero si pueden causar fisuración en los lugares aledaños aumentando la severidad del daño.

Figura 5.15. Fisuras y grietas reflejadas



Fuente: Elaboración por el autor

5.9 Otros daños

5.9.1 Descenso de la berma.

Se caracteriza por una elevación entre la berma y la calzada, debido a un desplazamiento de la berma. Permite la infiltración de agua adentro de la estructura del pavimento, acelerando su deterioro. Las causas que producen este tipo de daños es cuando los materiales usados en el pavimento y la berma son bastante diferentes. Otra causa asociada es por problemas de inestabilidad de los taludes aledaños. Ver Figura 5.16.

Figura 5.16. Descenso de la berma



Fuente: Elaboración por el autor

5.9.2 Surgencia de agua y finos.

Este surgimiento de agua acompañado de materiales finos de la capa base que sale por las grietas se da cuando circulan sobre estas las cargas de tránsito. Se observan manchas o material acumulado sobre la superficie al lado del borde de las grietas. Ver Figura 5.17. La surgencia de agua y finos se presenta en su mayoría en pavimentos semirrígidos.

Figura 5.17. Surgimiento de agua y finos



Fuente: Elaboración por el autor

5.9.3 Separación entre pavimento y berma.

La separación entre pavimento y berma como se ve en la Figura 5.18, permite la filtración del agua adentro de la estructura generando un daño acelerado del pavimento. Las causas que generan este tipo de daño es el movimiento de berma por problemas de inestabilidad en los taludes cercanos o que no se tiene liga entre la berma y la calzada.

Figura 5.18. Separación entre pavimento y berma



Fuente: Elaboración por el autor

5.10 Índices para evaluación de fallas en el pavimento

Los catálogos de fallas proporcionan un lenguaje común para identificar, describir y evaluar la gravedad de los daños, con el fin de minimizar el componente subjetivo del proceso visual, garantizar la repetibilidad del método y facilitar la comunicación entre los involucrados.

Estos aspectos son esenciales para una agencia de carreteras motivada en realizar un eficiente sistema de gestión de redes de carreteras; procedimientos normalizados de recopilación de datos, índices robustos de condiciones del pavimento y expertos en procedimientos de recopilación de datos del pavimento son requisitos esenciales para el sistema.

Los aspectos primarios que guían la definición del Sistema de Gestión de Pavimentos son el confort, la seguridad y los aspectos económicos (Coenen & Golroo, 2017), (Loprencipe et al., 2017); una estrategia adecuada de mantenimiento se puede definir a través de un equilibrio entre ellos, utilizando herramientas específicas que se apoyan en la información actual de las condiciones del pavimento y considerando las prioridades del ente regulador.

En la literatura (Loprencipe et al., 2017), (Bennett et al., 2006), (ASTM D6433-18, 2018), (Shahin, 2005), se muestran varias herramientas que permiten sintetizar la condición actual del pavimento, para definir el orden de intervención prioritario, incluyendo la predicción del rendimiento y el análisis económico. En función de la herramienta adoptada, son necesarios datos de entrada específicos, que se caracterizan por diferentes niveles de precisión y se adquieren mediante diferentes técnicas, lo que contribuye a determinar el rendimiento global y el costo de un Sistema de Gestión de Pavimentos. Los índices más comunes son: el Índice de Condición del Pavimento (PCI), el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), la Profundidad de las Huellas (RD) y el Índice de Serviciabilidad del Pavimento (PSI), siendo los más utilizados para representar un aspecto global o particular del pavimento en una carretera. Ver Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Índices comunes para la evaluación de pavimentos

Atributo del Pavimento	Función en el Pavimento	Característica en el Pavimento	Índices o indicadores
Estructural	Integridad Estructural	Defectos Superficiales	Índice de deterioros superficiales
		Propiedades mecánicas	Deflexiones
			Modulo Elástico

Funcional	Servicibilidad	Rugosidad	Índice de rugosidad internacional (IRI)
		Servicibilidad	Índice de servicibilidad presente (PSI)
	Seguridad	Textura	Profundidad media de la textura (MTD)
		Fricción	Índice de fricción internacional (IFI)

Fuente: autor

5.10.1 Índice de Condición del Pavimento (PCI)

La metodología PCI se deriva de la norma americana ASTM D6433-07, para ser usada en Colombia esta metodología, el Ingeniero Luis Vásquez de la Universidad Nacional de Manizales, ha hecho algunos ajustes y teniendo en cuenta algunas variables importantes. El Índice de Condición del Pavimento (PCI) por su estructura se establece como la metodología de diagnóstico más aceptada para la calificación y evaluación de pavimentos flexibles y rígidos. En este documento se tratará solo aplicaciones en pavimentos flexibles. Esta es una metodología de fácil implementación, además no requiere de equipos especializadas más allá de las que constituyen el sistema, es muy usada en los modelos de gestión vial disponibles en la actualidad.

Según (Al-Neami et al., 2018), el PCI o Índice de Condición del Pavimento es una medida cuantitativa de la condición de un pavimento, que se utiliza para evaluar su estado y determinar cuándo es necesario realizar reparaciones o mantenimiento preventivo. El PCI se calcula mediante una inspección visual del pavimento, en la que se evalúan diversos factores como la irregularidad superficial, el agrietamiento, la deformación, la textura y el desgaste. Cada uno de estos factores se califica según una escala predefinida, y luego se realiza una ponderación para obtener una calificación global del pavimento en una escala del 0 al 100, tal como se muestra en la Tabla 5.3., donde 100 representa un pavimento en excelentes condiciones y 0 representa un pavimento completamente deteriorado. El PCI es una herramienta valiosa para la gestión del pavimento, ya que permite a los ingenieros y responsables de mantenimiento planificar y priorizar las reparaciones y el mantenimiento en función de la condición del pavimento y los recursos disponibles. Además, el seguimiento del PCI a lo largo del tiempo puede ayudar a detectar tendencias y problemas en el pavimento, y a evaluar la efectividad de las estrategias de mantenimiento y reparación implementadas.

Tabla 5.3. Valores PCI

PCI value	Pavement Conditions
0-10	<i>Failed (failed)</i>
10-25	<i>Very Poor (Very Poor)</i>
25-40	<i>Poor (Poor)</i>
40-55	<i>Fair (Fair)</i>
55-70	<i>Good (good)</i>
70-85	<i>Very Good (Very Good)</i>
85-100	<i>Excellent</i>

Fuente: (Gadha Gilang Kencana et al., 2018, p. 3)

El pavimento de una carretera con el tiempo experimenta una disminución en la calidad. La determinación del valor promedio de PCI solo se puede obtener después de la identificación de los daños en cada segmento de la carretera observada. Según (Shahin, 2005), los siguientes son los tipos de daños evaluados:

1. Agrietamiento de cocodrilo, pequeñas grietas longitudinales y paralelas que se interconectan formando una apariencia de cocodrilo.
2. Exudación, exceso de asfalto en la capa de desgaste, que puede pegarse a las ruedas o zapatos del vehículo.
3. Agrietamiento en bloque, grietas que forman bloques cuadrados e interconectados.
4. Irregularidades, el pavimento tiene baches o depresiones que afectan la calidad de conducción.
5. Corrugación, el asfalto se ve arrugado, lo que afecta la calidad de conducción.
6. Depresión, áreas de mayor dureza experimentan una leve disminución en la elevación.
7. Agrietamiento en el borde, fisuras en el pavimento en el borde de la carretera debido a una mezcla antigua de aglutinante de asfalto.
8. Agrietamiento de reflexión de juntas, fisuras en áreas donde no hay relleno o fisuras en áreas llenas de relleno en la unión.

9. Caída de carril / hombro, hay una gran diferencia entre el borde del pavimento y el hombro de la carretera.
10. Agrietamiento longitudinal y transversal, fisuras en áreas donde no hay relleno o fisuras en áreas llenas de relleno.
11. Parcheo y parcheo de cortes de servicios, parches en la carretera que reducen la calidad y comodidad en la conducción.
12. Agregado pulido, el agregado se ve liso y desgastado.
13. Baches, un hoyo que se produce en la sección de la carretera.
14. Cruce de ferrocarril, hay cruces de ferrocarril que provocan una disminución en la comodidad de conducción.
15. Surcos, disminución en la superficie del pavimento que ocurre en las ranuras de las ruedas del vehículo.
16. Empuje, asfalto urgente que causa una disminución en la comodidad de conducción.
17. Agrietamiento de deslizamiento, fisuras que provocan deformación.
18. Inflamación, el asfalto se expande / abulta causando una leve disminución en la comodidad de conducción.
19. Desgaste y desintegración debido al clima, el agregado o el aglutinante de asfalto comienzan a desprenderse.

5.10.2 Índice de Rugosidad Internacional (RD)

El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es una medición de rugosidad estandarizada, desarrollada por el Banco Mundial en 1980 (Gillespie et al., 1986), que proporciona una clasificación de calidad de marcha en términos de perfil longitudinal, recorrido por una rueda. El IRI se define como la relación filtrada de la desviación acumulada de la suspensión del vehículo dividida por la distancia recorrida. El perfil necesario para el cálculo del índice se puede obtener mediante cualquier instrumento de medición válido, desde el nivel de varilla estática hasta los perfiles inerciales de alta velocidad, según se informa en (ASTM E1364-95, 2017). La rugosidad del pavimento está directamente relacionada con la calidad de marcha, el confort y la seguridad.

5.10.3 Índice de Serviciabilidad del Pavimento (PSI)

El Índice de Serviciabilidad del Pavimento (PSI) es un parámetro que se utiliza para describir la condición funcional del pavimento con respecto a la calidad de la conducción: proporciona una valoración de la capacidad de la carretera para servir al tráfico, teniendo en cuenta varias características de la carretera, como la variación de pendiente, la profundidad de las huellas, las grietas y la superficie de parcheo, como se informa en (Múčka, 2017). El PSI se utiliza para proporcionar una evaluación integral de las condiciones del pavimento, tanto para aspectos de seguridad como de comodidad: su complejidad requiere varios datos de entrada para el cálculo.

5.11 Periodos de diseño de las obras de rehabilitación del pavimento

La Tabla 5.4, presenta los periodos de diseño propuestos para las obras iniciales de rehabilitación de los pavimentos asfálticos de la red vial nacional. Estos periodos están adaptados a la clasificación vial establecida por el INVÍAS y tienen en cuenta la administración de la red carretera terciaria. Es importante tener en cuenta que los años indicados en la tabla no deben interpretarse como un período exacto y obligatorio, sino como el tiempo necesario para realizar un análisis de tráfico y circular el número estimado de ejes equivalentes sobre las obras de rehabilitación.

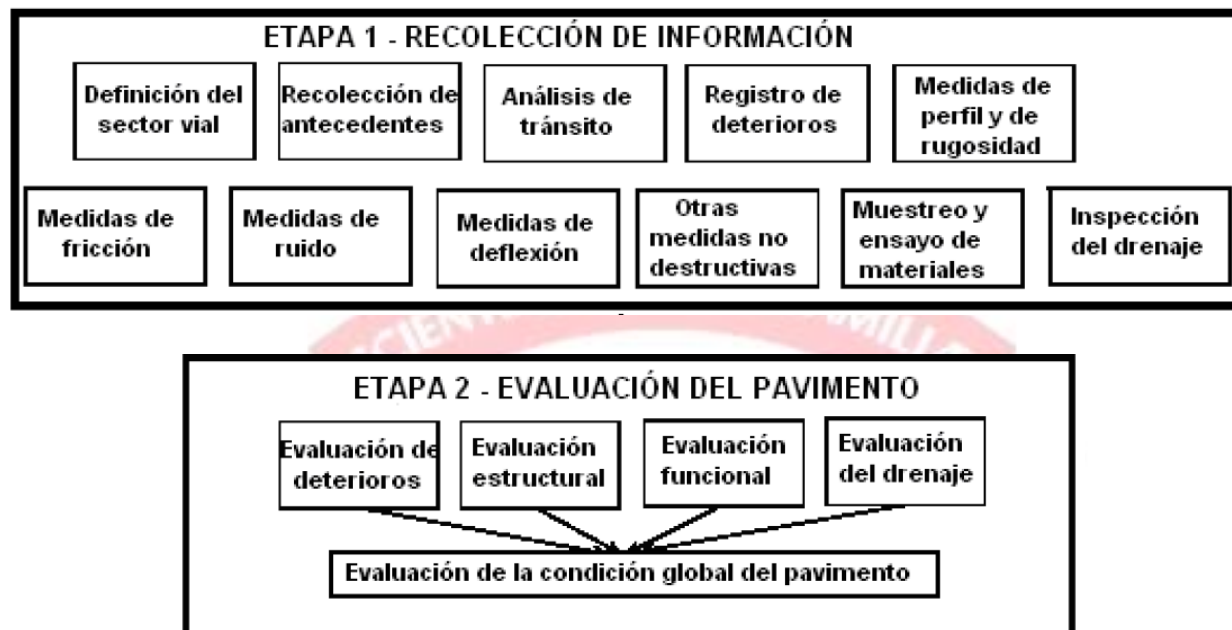
Tabla 5.4. Periodos de diseño de las obras de rehabilitación de los pavimentos asfálticos de las carreteras nacionales.

ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN	CATEGORÍA DEL TRÁNSITO		
	NT1	NT2	NT3
	Caminos rurales con tránsito medio y bajo	Colectoras interurbanas, caminos rurales e industriales principales	Autopistas interurbanas, caminos interurbanos principales
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO DURANTE EL PERÍODO DE DISEÑO DE LAS OBRAS DE REHABILITACIÓN		
	< $0.5 \cdot 10^6$	$0.5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6$	> $5 \cdot 10^6$
	PERÍODO DE DISEÑO (años)		
Restauración	Depende de las técnicas de intervención		
Refuerzo	8	10	12
Reciclado	10	15	20
Reconstrucción	10	15	20

Fuente: (INVIAS, 2016)

Las etapas de recolección de datos fijadas por la Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación, se puede resumir en la siguiente figura.

Figura 5.19. Etapas de recolección de información y evaluación del pavimento.



Fuente: (INVIAS, 2008)



6 METODOLOGÍA

La metodología abordada en este documento para alcanzar el objetivo general y dar respuesta a la pregunta de investigación, inicia en un rastreo bibliográfico. Esto permitirá obtener la mayor cantidad de información disponible asociada a las metodologías tecnológicas usadas para medir la calidad del pavimento flexible. Dicha información se toma de bases de datos académicas, revistas especializadas, libros, tesis de grado y material gubernamental. Seguidamente se filtrará la información para descartar documentos que no aporta a la temática de tratada en esta investigación. Continuando se clasifica el material bibliográfico para proceder a la redacción del documento.

Con el material ya discriminado se presentan cuáles son las ventajas y desventajas de cada metodología. Además de esto se mostrarán aplicaciones usando metodologías convencionales y tecnológicas referenciando los hallazgos encontrados. Por último, se presentará un comparativo de cada metodología definiendo las herramientas necesarias para ejecutarla.

En general, se sigue el siguiente marco metodológico:

1. **Revisión bibliográfica exhaustiva:** Realizar una búsqueda sistemática y detallada de las metodologías tradicionales y las tecnologías emergentes utilizadas para la evaluación de la calidad de los pavimentos flexibles. Esta revisión debe incluir fuentes confiables y actualizadas, como artículos científicos, informes técnicos, tesis y libros especializados.
2. **Selección de criterios de evaluación:** Definir los criterios de evaluación que se utilizarán para comparar las metodologías tradicionales y las tecnologías emergentes. Estos criterios deben ser relevantes y significativos para el objeto de estudio y deben estar basados en las principales variables que afectan la calidad de los pavimentos flexibles, como la resistencia a la deformación, la resistencia a la fatiga, la rugosidad, entre otras.

Algunos criterios que se podrían considerar para evaluar la calidad de las tecnologías emergentes y las metodologías tradicionales para la evaluación de pavimentos flexibles podrían ser:

- a. **Precisión:** ¿Qué tan precisa es la tecnología o metodología en la detección y evaluación de los daños en el pavimento?

- b. **Eficiencia:** ¿Cuánto tiempo y recursos se requieren para llevar a cabo la evaluación utilizando la tecnología o metodología?
- c. **Confiabilidad:** ¿Qué tan confiable es la tecnología o metodología en la detección de daños en el pavimento?
- d. **Costo:** ¿Cuánto cuesta la implementación y uso de la tecnología o metodología en comparación con otras opciones disponibles?
- e. **Facilidad de uso:** ¿Qué tan fácil es de utilizar y de interpretar la información obtenida a través de la tecnología o metodología?

A continuación, se presentan algunos indicadores sugeridos para cada criterio:

i. Precisión:

- Porcentaje de fallas detectadas correctamente
- Porcentaje de fallas identificadas en comparación con las detectadas en una evaluación visual.

ii. Eficiencia:

- Tiempo promedio requerido para llevar a cabo la evaluación
- Costo operativo por unidad de área evaluada

iii. Confiabilidad:

- Coeficiente de variación interobservador
- Reproducibilidad de las mediciones

iv. Costo:

- Costo por unidad de área evaluada
- Costo de adquisición e instalación del equipo o software.

v. Facilidad de uso:

- Tiempo de entrenamiento necesario para poder utilizar la tecnología o metodología

- Cantidad de pasos necesarios para realizar la evaluación

Es importante destacar que estos criterios e indicadores son solo una guía y pueden ser adaptados y ajustados de acuerdo a las necesidades específicas.

3. **Análisis comparativo:** Realizar un análisis comparativo de las metodologías tradicionales y las tecnologías emergentes, utilizando los criterios de evaluación seleccionados en el paso anterior. Este análisis debe permitir identificar las fortalezas y debilidades de cada una de las metodologías evaluadas, así como las oportunidades de mejora.
4. **Elaboración de conclusiones:** Con base en los resultados obtenidos en el análisis comparativo, se deben elaborar conclusiones que permitan determinar cuál de las metodologías evaluadas es la más adecuada para la evaluación de la calidad de los pavimentos flexibles. Estas conclusiones deben estar respaldadas por argumentos sólidos y sustentados en los criterios de evaluación seleccionados.
5. **Propuestas de mejora:** Finalmente, se deben proponer mejoras y recomendaciones para las metodologías tradicionales y las tecnologías emergentes evaluadas, con el fin de optimizar su uso y mejorar la calidad de la evaluación de los pavimentos flexibles. Estas propuestas deben estar basadas en las oportunidades de mejora identificadas en el análisis comparativo y deben ser viables y factibles de implementar en la práctica.

Figura 6.1. Marco metodológico para realizar comparación entre tecnologías



Fuente: elaboración propia.

En la actualidad, existen diversas tecnologías para la detección de fallas en pavimentos, tanto tradicionales como emergentes, que son evaluadas en base a diferentes indicadores de selección como la precisión, eficiencia, confiabilidad, costo y facilidad de uso. Sin embargo, la revisión bibliográfica de estas tecnologías es muy amplia y se basa en estudios realizados por los investigadores, lo que hace que la calificación de cada uno de estos indicadores sea cualitativa e interpretativa. Es importante destacar que estas opiniones expresan el conocimiento obtenido a través de la consulta de la literatura, sin haber realizado un diseño experimental que permita obtener experiencias de primera mano en sitio.

Por lo tanto, la calificación de estas tecnologías debe ser vista como un marco de referencia para el análisis y no como la verdad absoluta. Es necesario profundizar en la investigación y realizar pruebas en campo para obtener resultados más precisos y fiables, que permitan determinar

cuál es la tecnología más adecuada para cada caso en particular. Es importante tener en cuenta que las tecnologías emergentes pueden tener un gran potencial para la detección de fallas en pavimentos, pero es necesario evaluar su eficiencia y rentabilidad antes de su implementación.

6.1 Paradigma de investigación

El paradigma de investigación se refiere al conjunto de creencias, valores y metodologías que guían la investigación en un área particular de estudio. En el caso de la revisión bibliográfica de tecnologías tradicionales y emergentes para la detección de fallas en pavimentos, el paradigma de investigación puede ser descrito como interpretativo, ya que se aborda desde una óptica del autor, quien, a través de la lectura de las diferentes fuentes, interpreta la utilidad de cada una de las tecnologías, sin tener un soporte experimental, o datos numéricos concretos. Por tanto, los resultados obtenidos obedecen a su propia concepción y entendimiento de las ventajas y desventajas que ofrece cada tecnología.

El paradigma interpretativo se enfoca en la comprensión profunda de un tema en concreto, en este caso la tecnología para la detección de fallas en pavimentos. Se basa en interpretaciones subjetivas, por lo que el investigador debe buscar entender las perspectivas y experiencias de los investigadores consultados sobre las tecnologías de auscultación de pavimentos.

En este sentido, la revisión bibliográfica de tecnologías para la detección de fallas en pavimentos es un ejemplo de investigación interpretativa, ya que se busca comprender cómo las tecnologías han sido desarrolladas y utilizadas en el contexto de la gestión de pavimentos. Se basa en la revisión de literatura existente para construir una comprensión profunda de las tecnologías y los indicadores de selección, pero reconoce que la evaluación de estos indicadores es subjetiva y está influenciada por la perspectiva del autor. El paradigma interpretativo es útil en este caso porque permite una comprensión profunda, incluyendo sus ventajas y desventajas desde diferentes perspectivas. Además, este enfoque de investigación puede ayudar a identificar áreas en las que se necesita profundizar o donde se necesitan mejoras en la tecnología existente.

6.2 Enfoque de la investigación: enfoque cualitativo

En el caso específico de la revisión bibliográfica de tecnologías para la detección de fallas en pavimentos, el enfoque cualitativo se utiliza para explorar y comprender las opiniones, percepciones y conocimientos de los autores de los estudios revisados en cuanto a la viabilidad de

estas tecnologías, así como para proporcionar una descripción detallada y una interpretación de los datos recopilados. En lugar de simplemente contar el número de estudios que utilizan una determinada tecnología, por ejemplo, se exploran las razones detrás de la elección de una tecnología específica y se analizan las limitaciones y ventajas de cada una.

6.3 Técnicas de recolección de datos: análisis documental

Las técnicas de recolección documental son esenciales para obtener información relevante en la investigación de tecnologías tradicionales y emergentes para la detección de fallas en pavimentos flexibles. Esta técnica consiste en el análisis y recopilación de documentos que contengan información pertinente sobre el tema en cuestión.

En el caso de la investigación de tecnologías para la detección de fallas en pavimentos flexibles, las técnicas de recolección documental pueden incluir la revisión de publicaciones científicas, informes técnicos, tesis y disertaciones, y otros documentos relacionados. Estos documentos pueden proporcionar información sobre las tecnologías disponibles, su eficacia en la detección de fallas en pavimentos, así como su costo y facilidad de uso.

La revisión de publicaciones científicas es una técnica de recolección documental común en la investigación de tecnologías para la detección de fallas en pavimentos. Esta técnica implica la revisión sistemática de artículos científicos publicados en revistas especializadas en ingeniería civil, pavimentos, y tecnologías de inspección. Esta técnica permite al investigador conocer los últimos avances en el campo, las limitaciones de las tecnologías existentes, y las áreas que necesitan más investigación y desarrollo.

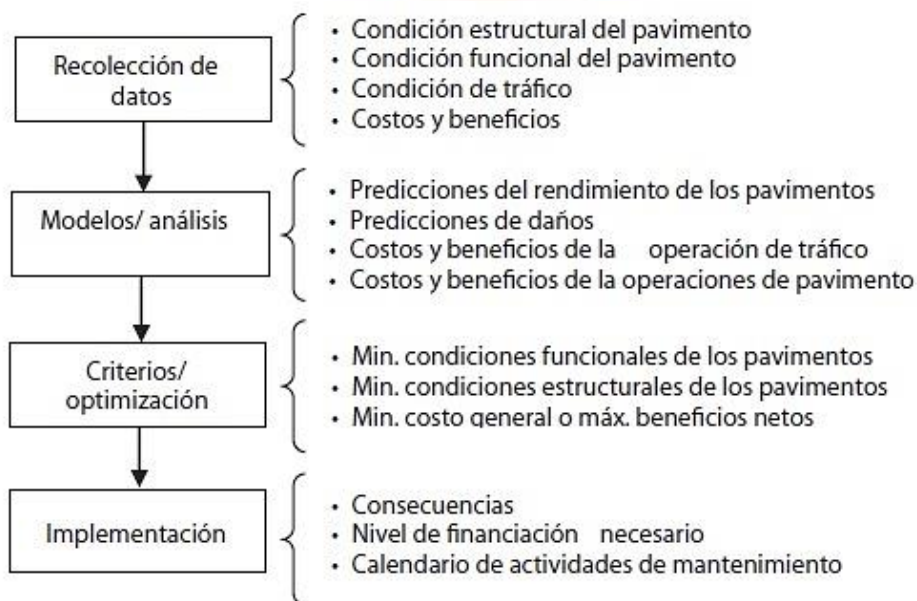
Otra técnica de recolección documental es la revisión de informes técnicos y documentos de empresas que desarrollan y comercializan tecnologías de inspección de pavimentos. Estos documentos pueden proporcionar información sobre la eficacia, el costo y la facilidad de uso de las tecnologías de inspección de pavimentos existentes en el mercado.

6.4 Sistemas de gestión de pavimentos

En general, el proceso de mantenimiento de una vía la recolección de datos, el análisis de modelos, la optimización de criterios y la implementación de medidas, según se indica en la Figura 6.2. El propósito de la recolección de datos es mantener un registro objetivo y preciso del estado actual de los pavimentos. Estos datos pueden ser recopilados durante varios años y utilizados para

crear modelos que pronostiquen el estado futuro del pavimento [9]. Cuando se evalúan estos modelos para tomar decisiones, se debe establecer un conjunto de niveles de intervención según los tipos de datos recopilados. Hay varias opciones para el mantenimiento, cada una con su propia curva de rendimiento. Por lo tanto, el siguiente paso es analizar los costos y beneficios de las estrategias posibles dentro de un período determinado, considerando las posibles consecuencias de la implementación.

Figura 6.2. Etapas de un Sistema de Gestión de Pavimento (PMS)



Fuente: (Porrás-Díaz, Ramón-Suárez, Mejía-Melgarejo, & Parra-Rodriguez, 2014)

6.5 Matriz bibliográfica

La construcción de una matriz bibliográfica es una herramienta útil para el estudio y análisis de un tema específico, en este caso, las tecnologías tradicionales y emergentes para detección de fallas en pavimentos flexibles. Una matriz bibliográfica es una tabla que organiza la información de las fuentes bibliográficas seleccionadas para el estudio de manera sistemática y ordenada.

La construcción de una matriz bibliográfica permite identificar de manera rápida y precisa las características y atributos de las diferentes tecnologías disponibles en la literatura. Por ejemplo, se pueden identificar los principales indicadores de selección como la precisión, eficiencia,

confiabilidad, costo y facilidad de uso para cada tecnología. Además, permite comparar las tecnologías y establecer relaciones entre ellas, lo que puede conducir a una mejor comprensión de las ventajas y desventajas de cada una.

Además, la misma también puede ayudar a identificar lagunas en la literatura y áreas de investigación que requieren mayor atención. Por ejemplo, si hay un número limitado de estudios sobre una tecnología específica, puede ser necesario realizar más investigaciones para comprender mejor su funcionamiento y viabilidad.

En la tabla siguiente, se pueden visualizar los diferentes artículos científicos utilizados para construir una matriz bibliográfica. Ver ANEXO A .



7 RESULTADOS

La revisión bibliográfica de las tecnologías tradicionales más utilizadas para la evaluación de daños en los pavimentos flexibles ha arrojado varios resultados importantes. En primer lugar, se ha observado que la mayoría de las tecnologías tradicionales utilizadas para la evaluación de daños en los pavimentos flexibles se basan en la observación visual y la inspección manual. Esto incluye la evaluación de grietas, deformaciones y otros tipos de daños superficiales mediante la observación directa de la superficie del pavimento. En segundo lugar, se ha observado que estas tecnologías tradicionales presentan ciertas limitaciones en términos de precisión y fiabilidad. La evaluación visual y manual de los daños en los pavimentos flexibles puede ser influenciada por diversos factores, como la experiencia del inspector, la iluminación y las condiciones climáticas. Además, estas técnicas pueden no detectar daños internos o estructurales que no sean visibles a simple vista. En tercer lugar, se han identificado algunas tecnologías tradicionales más avanzadas que pueden mejorar la precisión y fiabilidad de la evaluación de daños en los pavimentos flexibles. Estas incluyen la medición de la rugosidad y la textura superficial, la evaluación de la deflexión y el uso de la técnica de ultrasonido para detectar daños internos. Finalmente, se ha observado que el uso de tecnologías tradicionales para la evaluación de daños en los pavimentos flexibles está siendo cada vez más complementado por técnicas no destructivas y tecnologías avanzadas, como el uso de cámaras digitales, escáneres por láser y el uso de sensores inalámbricos para el monitoreo en tiempo real.

7.1 Tecnologías tradicionales

Los pavimentos flexibles son una estructura de múltiples capas que se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, calles y otros tipos de infraestructuras. La evaluación de los pavimentos flexibles es un proceso esencial para determinar su durabilidad, rendimiento y seguridad. A lo largo de los años, se han desarrollado varias tecnologías tradicionales para evaluar el comportamiento de los pavimentos flexibles, y han sido utilizadas ampliamente en todo el mundo. Las tecnologías tradicionales de evaluación de pavimentos flexibles se basan principalmente en ensayos destructivos y no destructivos, que incluyen la prueba de carga estática y dinámica, el deflectómetro de impacto, el deflectómetro de placa vibrante, el ensayo de caída de masa, la tomografía de resistividad eléctrica, entre otros. Estas tecnologías han sido ampliamente

utilizadas debido a su disponibilidad y a la fiabilidad de sus resultados. Sin embargo, a medida que la tecnología ha evolucionado, han surgido nuevas tecnologías emergentes para la evaluación de pavimentos flexibles. Estas tecnologías emergentes se basan en técnicas más avanzadas y sofisticadas, como el escaneo láser, la espectroscopía infrarroja, la tecnología de sensores inalámbricos, la inteligencia artificial, el aprendizaje automático, entre otros.

7.1.1 Inspección visual

La inspección visual es una herramienta básica para la evaluación de pavimentos flexibles, ya que permite identificar visualmente las fallas o defectos del pavimento. Sin embargo, en términos de tecnologías, se considera una técnica de bajo nivel tecnológico, y por lo tanto, no suele ser clasificada como una tecnología en sí misma (Miller & Bellinger, 2014). Además, la inspección visual debe complementarse con otras técnicas más avanzadas para obtener una evaluación completa y precisa del estado del pavimento.

La inspección visual es un método de evaluación de fallas en pavimentos flexibles que consiste en la observación directa de la superficie del pavimento por parte de un equipo de evaluadores capacitados. A pesar de ser un método sencillo y económico, tiene algunas limitaciones importantes. Entre las principales desventajas de la inspección visual se encuentra su lentitud y laboriosidad, ya que se requiere de un gran número de equipos para evaluar una extensa red de carreteras. Además, cuando se amplía el método y se involucra a muchas personas, es inevitable la subjetividad en las evaluaciones, lo que puede generar inconsistencias en los resultados, a pesar de que se den las directrices necesarias y se realicen muestreos periódicos para comprobar la precisión de las evaluaciones (INVIAS & Universidad Nacional de Colombia, 2006).

Otra limitación de la inspección visual es su alto costo, ya que se requiere de una gran cantidad de vehículos y personal para llevar a cabo la evaluación en toda una red de carreteras. A pesar de estas limitaciones, la inspección visual sigue siendo una herramienta útil para la evaluación preliminar de pavimentos flexibles, aunque su uso se debe complementar con otras tecnologías más avanzadas para una evaluación más completa y precisa.

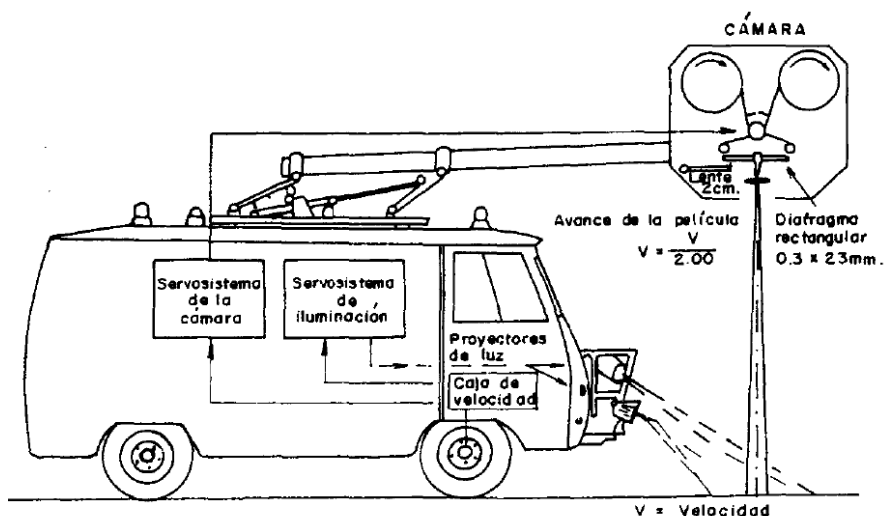
7.1.2 Equipo GERPHO

Esta herramienta fue desarrollada en Francia siguiendo una idea japonesa. Consiste en una cámara de grabación que se sujeta a un brazo metálico en la parte superior de un vehículo que se mueve a una velocidad media de 60 kilómetros por hora. Durante el recorrido, se genera una

película de 35mm a una escala de 1:200 con un ancho de perfil de 5 metros que abarca todo lo que se encuentra dentro de este espacio, como arneses, señalización, bordes y drenaje. Para minimizar la variabilidad causada por la luz, se recomienda realizar la inspección durante la noche con iluminación artificial. Se estima que el rendimiento del sistema es de alrededor de 200 kilómetros por día, durante una jornada laboral de 8 horas (Montejo Fonseca, 1998). Ver Figura 7.1.

La metodología GERPHO (Gestión de la Red de Pavimentos a través de Imágenes de Alta Resolución) se ha consolidado como una técnica innovadora y eficiente para la evaluación de pavimentos. En comparación con la inspección visual, la metodología GERPHO ofrece ventajas como mayor rapidez, exhaustividad y objetividad en la evaluación, ya que se utiliza tecnología de imágenes de alta resolución y se evita la subjetividad del personal de inspección a pie. Además, los registros generados por GERPHO permiten realizar comparaciones en diferentes momentos del tiempo, lo que facilita la detección del deterioro del pavimento a lo largo del tiempo. Sin embargo, como toda metodología, GERPHO presenta limitaciones, como la incapacidad para detectar fisuras de pequeño espesor y la falta de información sobre la profundidad de las deformaciones. Además, la fase de interpretación de los videos puede ser menos eficiente que la evaluación realizada por vehículos en carretera.

Figura 7.1. Equipo Gerpho. Unidad filmadora. Vista lateral.



Fuente: (Montejo Fonseca, 1998).

7.1.3 Deflectometría

Entre las tecnologías más utilizadas para la evaluación de pavimentos flexibles se encuentra la deflectometría, un método no destructivo que permite medir la respuesta estructural del pavimento ante la carga de un peso. Esta técnica consiste en aplicar una carga dinámica sobre la superficie del pavimento y medir la deflexión resultante en varios puntos de la estructura. A partir de estas mediciones se puede obtener información acerca de la rigidez del pavimento, la resistencia a la deformación y la capacidad de soporte.

La deflectometría presenta una serie de ventajas frente a otras técnicas de evaluación, ya que es rápida, no invasiva y permite obtener resultados en tiempo real. Además, proporciona información detallada sobre el comportamiento estructural del pavimento, lo que permite identificar de manera precisa las áreas que requieren reparación o mantenimiento.

Sin embargo, la deflectometría también tiene sus limitaciones, como la dificultad para obtener mediciones precisas en áreas con irregularidades o con presencia de tráfico intenso. Además, la interpretación de los resultados requiere de personal especializado y la adquisición de equipos específicos, lo que puede resultar costoso para algunos usuarios. A pesar de estas limitaciones, la deflectometría se ha convertido en una técnica ampliamente utilizada para la evaluación de pavimentos flexibles en todo el mundo debido a su eficacia y precisión en la identificación de problemas en la estructura del pavimento.

Algunos de los ensayos más comunes para la deflectometría incluyen:

1. FWD (Falling Weight Deflectometer): Este ensayo se realiza mediante la aplicación de una carga en la superficie del pavimento y la medición de la deflexión que se produce en el mismo. Se utiliza para evaluar la capacidad estructural de la carretera.
2. LWD (Light Weight Deflectometer): Similar al FWD, pero utiliza una carga más ligera y es utilizado para evaluar la calidad de la subrasante del pavimento.
3. GPR (Ground Penetrating Radar): Este ensayo se realiza mediante la emisión de ondas electromagnéticas a través del pavimento y la medición del tiempo que tardan en ser reflejadas en la superficie. Se utiliza para determinar la profundidad y la ubicación de las capas del pavimento.

4. SCPT (Seismic Cone Penetration Test): Este ensayo se realiza mediante la medición de la velocidad de las ondas sísmicas que se propagan a través del pavimento. Se utiliza para evaluar la resistencia y la densidad de la subrasante.
5. HWD (Heavy Weight Deflectometer): Similar al FWD, pero utiliza una carga mucho más pesada y es utilizado para evaluar pavimentos de aeropuertos y puertos.

7.1.4 Deflectómetro de caída de peso (FWD)

El deflectómetro de caída de peso (Falling Weight Deflectometer o FWD, por sus siglas en inglés) es un equipo utilizado para evaluar la capacidad estructural de los pavimentos flexibles mediante la medición de la deformación vertical bajo una carga dinámica. El FWD consta de una placa de carga circular montada en la parte inferior de un cilindro metálico que se eleva y se deja caer sobre el pavimento. La placa de carga puede tener diferentes diámetros, siendo los más comunes los de 300 y 450 mm, y la carga que se aplica es variable, pudiendo llegar hasta 80 kN. En la parte superior del cilindro se encuentra un sensor de aceleración que mide la respuesta del pavimento a la carga (Ocaña-Ortiz & Cruz-Rubio, 2019). Ver Figura 7.2.

Figura 7.2. Deflectómetro FWD



Fuente: (Alfonso-Barrera, 2019)

Durante el ensayo, el FWD se coloca sobre la superficie del pavimento y se sujeta mediante una serie de anclas. Se aplica una carga dinámica mediante la elevación y caída del cilindro y se mide la deflexión en varios puntos del pavimento utilizando una serie de sensores que miden la respuesta

del pavimento a la carga. La velocidad de carga y la tasa de registro de datos son ajustables y se pueden adaptar a las condiciones específicas del pavimento y del ensayo.

A partir de los datos registrados durante el ensayo, se pueden calcular varios parámetros importantes, como la capacidad portante del pavimento, la rigidez del pavimento, la profundidad del refuerzo y la evaluación de la uniformidad del pavimento. Estos parámetros se utilizan para determinar la capacidad estructural del pavimento y para identificar las áreas que requieren reparación o mantenimiento.

El FWD es un ensayo muy utilizado en la evaluación de pavimentos flexibles debido a su capacidad para proporcionar información detallada sobre la capacidad estructural del pavimento en un corto periodo de tiempo. Además, es un ensayo no destructivo y no invasivo, lo que significa que no se requiere cortar el pavimento para realizar el ensayo. Sin embargo, una de las desventajas del FWD es que puede generar altos niveles de ruido y vibraciones, lo que puede afectar a las personas y estructuras cercanas al sitio del ensayo.

Figura 7.3. Deflectómetro LWD



Fuente: (Alfonso-Barrera, 2019)

7.1.5 Deflectómetro de peso ligero (LWD)

El deflectómetro de carga ligera o LWD (del inglés, Light Weight Deflectometer) es un equipo utilizado para evaluar la resistencia y capacidad portante de los pavimentos flexibles. Este equipo consiste en una pequeña placa circular con un diámetro de 300 mm y un peso de 15 kg que se deja caer desde una altura de 500 mm sobre la superficie del pavimento (Alfonso-Barrera, 2019), ver

Figura 7.3. El LWD mide la deflexión instantánea producida por la carga aplicada en la superficie del pavimento. Esta deflexión es medida por un sensor de aceleración que se encuentra dentro del equipo y se transmite a un software especializado que calcula el módulo de elasticidad y el coeficiente de reacción del pavimento.

Entre las ventajas del LWD se encuentra su portabilidad, ya que es un equipo ligero y fácil de transportar. Además, su método de ensayo es rápido y no requiere de una preparación especial del pavimento, como sí ocurre con el FWD. También es menos costoso que el FWD y requiere menos personal para operarlo. Sin embargo, una de las principales desventajas del LWD es que solo mide la resistencia superficial del pavimento, lo que puede ser un problema si el pavimento se encuentra dañado en capas más profundas. Además, el LWD no puede medir la distribución de cargas a diferentes profundidades del pavimento, como sí lo hace el FWD (Alfonso-Barrera, 2019).

El ensayo con el LWD se realiza dejando caer la placa circular sobre diferentes puntos del pavimento a lo largo de una línea de ensayo previamente definida. Se toman al menos tres mediciones en cada punto para garantizar la precisión de los resultados. El software especializado se encarga de realizar los cálculos necesarios y generar un reporte con los resultados obtenidos.

7.1.6 Deflectómetro de haz de Benkelman (BBD)

Esta es una herramienta que se utiliza para evaluar la condición de los pavimentos actuales permitiendo implementar las medidas de mantenimiento convenientes para un flujo de tráfico estable y eficaz. El deflectómetro de haz de Benkelman (BBD) y el deflector de caída (FWD) son los métodos implementados para evaluar y fortalecer los pavimentos flexibles debido a que su procedimiento no es destructivo.

El deflectómetro de haz de Benkelman (BBD) fue el primer método desarrollado para la medición de las deflexiones del pavimento y es económico y fácilmente disponible. No obstante, conlleva un alto grado de inseguridad debido a que no simula las cargas de grado de movimiento. Por otra parte, también encontramos el (IRC) un equipo sofisticado como el deflectómetro de caída de peso (FWD) para carreteras de gran tamaño. La técnica FWD no es implementada comúnmente ya que es un sistema muy caro. Sin embargo, imparte carga dinámica en el pavimento y registra la respuesta de cada capa del pavimento. Por lo cual muchos países todavía usan el BBD para la evaluación de redes viales. También encontramos el deflectómetro de caída de peso ligero (LWD) esta es una versión más leve del FWD en la que se puede aplicar una cantidad pequeña de carga

de impacto y el deflectómetro de peso rodante (RWD) es una versión mejorada del BBD con la capacidad de realizar sondeos multipunto y cuenta con una mayor precisión.

En cumplimiento del objetivo del presente estudio, se elabora una tabla comparativa de las diferentes tecnologías tradicionales para la auscultación de defectos en los pavimentos flexibles, teniendo en cuenta los indicadores señalados en la metodología. V



Tabla 7.1. Calificación tecnologías tradicionales, donde se califica cada tecnología en función de su precisión, eficiencia, confiabilidad, costo y facilidad de uso, siendo 1 el puntaje más bajo, y 5 el puntaje más alto.

Tabla 7.1. Calificación tecnologías tradicionales

Tipo Tecnología	Tecnología	Tipo de ensayo	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas	Precisión	Eficiencia	Confiabilidad	Costo	Facilidad de uso	TOTAL CALIFICACIÓN	REFERENCIA CLAVE
EVALUACIÓN ESCALA DE LIKERT: 1) Pésimo, 2) Deficiente, 3) Aceptable, 4) Bueno, 5) Excelente												
TECNOLOGÍAS TRADICIONALES	Inspección visual	Observación	Observación directa del pavimento y sus condiciones	Bajo costo	Subjetividad en la evaluación	2	2	2	5	5	16	Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. Revista Nor@ndina, 133–140. https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133
	Viga Benkelman	Deflexión	Mide la deflexión bajo una carga estática	Bajo costo, fácil de usar	Sólo mide deflexión en un punto	3	3	3	4	4	17	Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. Revista Nor@ndina, 133–140. https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133
	Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD)	Impulso y respuesta	Mide la deflexión bajo una carga que impacta en el pavimento.	Mide la deflexión en varios puntos, alta precisión	Costo elevado, requiere personal capacitado	5	5	5	1	1	17	Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. Revista Nor@ndina, 133–140. https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133
	Deflectómetro ligero (Lightweight Deflectometer, LWD)	Impulso y respuesta	Mide la respuesta dinámica a una carga impulsiva en una zona más amplia que el FWD	Menor costo que el FWD, más portátil que el FWD	Sólo mide la deflexión en una zona limitada, requiere personal capacitado	4	4	4	3	3	18	Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. Revista Nor@ndina, 133–140. https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133
	HWD (Heavy Weight Deflectometer)	Deflexión	Mide la respuesta dinámica a una carga impulsiva en un área muy amplia	Mayor área de cobertura	Costo elevado, requiere personal capacitado	4	4	4	2	2	16	Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. Revista Nor@ndina, 133–140. https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133
	GPR (Ground Penetrating Radar)	Geofísico	Utiliza ondas electromagnéticas para medir la velocidad y la profundidad de las capas	No invasivo, útil para identificar diferentes capas	Requiere personal especializado para su interpretación	3	3	3	4	2	15	Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. Revista Nor@ndina, 133–140. https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133
	SCPT (Seismic Cone Penetration Test)	Geotécnico	Mide la resistencia al esfuerzo cortante del suelo	Útil para evaluar la capacidad portante del suelo	No proporciona información sobre el espesor de las capas	1	1	1	3	3	9	Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. Revista Nor@ndina, 133–140. https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133

Fuente: autor

Se observa entonces que el deflectómetro ligero, en términos de precisión, eficiencia y fiabilidad presenta un buen comportamiento, a un precio relativamente razonable, no obstante, requiere de personal capacitado para su interpretación. Se considera, no obstante, que dicha tecnología sigue dependiendo de la inspección visual, ya sea que se utilice o no un equipo GERPHO, y su utilidad viene muy asociada a los costos y la disponibilidad de personal idóneo que pueda interpretar los datos arrojados por los dispositivos.

7.2 Tecnologías emergentes

En los últimos años, se han desarrollado y perfeccionado una variedad de tecnologías emergentes para la evaluación de pavimentos. Estas tecnologías ofrecen nuevas herramientas y métodos de evaluación más precisos y eficientes, lo que permite a los ingenieros y técnicos evaluar la condición de los pavimentos de manera más efectiva. Además, estas tecnologías emergentes proporcionan información detallada sobre la estructura y el rendimiento del pavimento en tiempo real, lo que ayuda a tomar decisiones más informadas sobre la gestión y el mantenimiento de la infraestructura vial. A continuación, se presenta una revisión de las prácticas actuales y las tecnologías emergentes para la adquisición de datos para un sistema de gestión de pavimentos (PMS). En general, los vehículos utilizados cuentan con una plataforma multisensores que permite recolectar información georreferenciada mediante un sistema de posicionamiento basado en GPS, combinando datos provenientes de cámaras, láseres y otros sensores que permiten caracterizar ampliamente tanto la superficie del pavimento como el entorno vial.

Con el fin de proporcionar una clasificación de las tecnologías de detección disponibles para la adquisición de conjuntos de datos en un PMS, se han evaluado los siguientes criterios. Ver Tabla 7.2: precisión, que mide la variabilidad estadística de los datos; exactitud, que indica la diferencia entre los valores medidos y los valores verdaderos; resolución espacial, que indica la capacidad de detectar los cambios más pequeños en la superficie de la carretera; productividad, que se refiere a la capacidad de recolectar datos a una velocidad adecuada; costo de implementación; y automatización, que se refiere a la capacidad de procesar datos de forma automatizada. Cada una de estas tecnologías tiene sus propias ventajas y limitaciones y se pueden aplicar en diferentes situaciones para evaluar de manera más precisa y confiable la condición de los pavimentos.

Tabla 7.2. Clasificación de soluciones tecnológicas emergentes

Tecnología	Información	Precisión	Confiabilidad	Resolución Espacial	Productividad	Costo	Automatización
Cámara	2D	Media	Media	3-6 mm	Alta	Bajo	Alto
Cámara de escaneo lineal	2D	Alta	Alta	2 mm	Media	Medio	Medio
Imagen Laser 3D	3D	Alta	Alta	1 mm	Alta	Alto	Medio
TLS (Terrestrial Laser Scanner)	3D	Muy Alta	Alta	3-6 mm	Media	Alto	Bajo

Fuente: (Ragnoli et al., 2018)

Ahora bien, así como se presentó el análisis para las tecnologías tradicionales se presenta en la Tabla 7.3. Calificación tecnologías emergentes , la descripción de las metodologías emergentes. Encontrando que la mejor calificada es la cámara de escaneo lineal. A pesar de Imagen Laser 3D y TLS ofrecen mejores resultados de precisión y confiabilidad, su elevado costo, y la necesidad de capacitación técnica y difícil utilización, las hace menos atractivas.



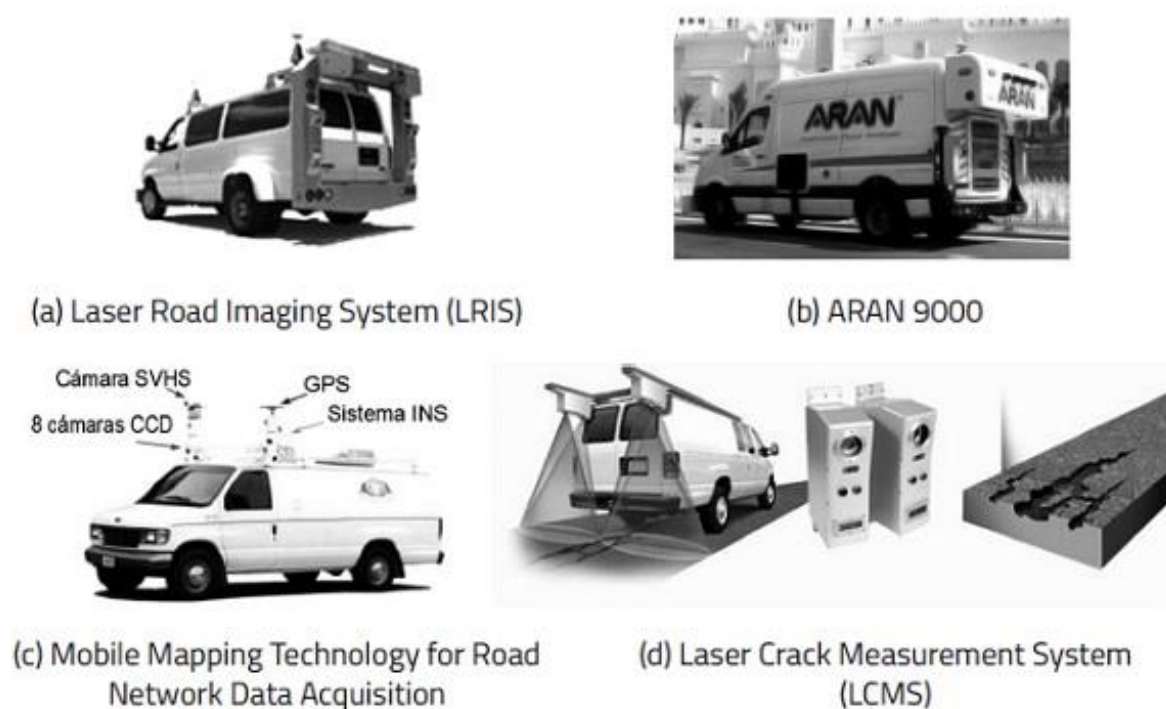
Tabla 7.3. Calificación tecnologías emergentes

Tipo Tecnología	Tecnología	Tipo de ensayo	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas	Precisión	Eficiencia	Confiable	Costo	Facilidad de uso	TOTAL CALIFICACIÓN	REFERENCIA CLAVE
TECNOLOGÍAS EMERGENTES	Cámara digital	Observación	Captura de imágenes digitales de la superficie del pavimento.	Precisión y objetividad. Eficiencia y rapidez. Registro digital y compartición de datos.	Costo adquisición de equipo y software de análisis. Interpretación subjetiva. Limitación en detección de defectos profundos	3	3	4	4	4	18	Ragnoli, A., De Blasiis, M., & Di Benedetto, A. (2018). Pavement Distress Detection Methods: A Review. <i>Infrastructures</i> , 3(4), 58. https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058 Alfonso-Barrera, J. D. (2019). Análisis de datos en la auscultación de pavimentos empleando equipos de prueba no destructiva [Tesis de Pregado]. <i>Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia</i> . Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. <i>Revista Nor@ndina</i> , 133–140. https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133
	Cámara de escaneo lineal	Observación	Similar a una cámara digital, escaneo lineal de imágenes del pavimento a lo largo de una trayectoria.	Alta resolución espacial. Evaluación rápida y eficiente. Análisis cuantitativo. Mayor objetividad. Registro y seguimiento histórico.	Costo elevado. Requerimientos técnicos y calibración. Dificultad para detectar defectos profundos. Limitaciones de cobertura y flexibilidad. Dependencia de condiciones ambientales. Complejidad	5	5	5	3	3	21	Ragnoli, A., De Blasiis, M., & Di Benedetto, A. (2018). Pavement Distress Detection Methods: A Review. <i>Infrastructures</i> , 3(4), 58. https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058 Alfonso-Barrera, J. D. (2019). Análisis de datos en la auscultación de pavimentos empleando equipos de prueba no destructiva [Tesis de Pregado]. <i>Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia</i> . Zakeri, H., Nejad, F. M., & Fahimifar, A. (2017). Image Based Techniques for Crack Detection, Classification and Quantification in Asphalt Pavement: A Review. <i>Archives of Computational Methods in Engineering</i> , 24(4), 935–977. https://doi.org/10.1007/s11831-016-9194-z
	Imagen Laser 3D	Observación	Captura de nube de puntos tridimensional que representa la superficie del pavimento.	Alta precisión y detalle. Cobertura amplia y rápida. Evaluación no intrusiva. Medición objetiva y cuantitativa. Seguimiento histórico y planificación de mantenimiento.	Costo inicial. Requerimientos técnicos y capacitación. Limitaciones en condiciones ambientales. Tiempo de procesamiento y análisis. Limitaciones en la detección de defectos subyacentes.	5	5	5	2	3	20	Ragnoli, A., De Blasiis, M., & Di Benedetto, A. (2018). Pavement Distress Detection Methods: A Review. <i>Infrastructures</i> , 3(4), 58. https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058 Alfonso-Barrera, J. D. (2019). Análisis de datos en la auscultación de pavimentos empleando equipos de prueba no destructiva [Tesis de Pregado]. <i>Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia</i> . Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. <i>Revista Nor@ndina</i> , 133–140. https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133 Zakeri, H., Nejad, F. M., & Fahimifar, A. (2017). Image Based Techniques for Crack Detection, Classification and Quantification in Asphalt Pavement: A Review. <i>Archives of Computational Methods in Engineering</i> , 24(4), 935–977. https://doi.org/10.1007/s11831-016-9194-z
	TLS (Terrestrial Laser Scanner)	Observación	Tecnología de captura de datos tridimensionales que utiliza escáner de datos montado sobre un trípode o dispositivo móvil.	Alta precisión. Cobertura amplia y rápida. Evaluación no intrusiva. Registro histórico y comparación. Visualización y análisis avanzados.	Costo inicial. Requerimientos técnicos y capacitación. Limitaciones en condiciones ambientales. Tiempo de procesamiento y análisis. Limitaciones en la detección de defectos subyacentes.	5	5	4	1	3	18	Ragnoli, A., De Blasiis, M., & Di Benedetto, A. (2018). Pavement Distress Detection Methods: A Review. <i>Infrastructures</i> , 3(4), 58. https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058 Alfonso-Barrera, J. D. (2019). Análisis de datos en la auscultación de pavimentos empleando equipos de prueba no destructiva [Tesis de Pregado]. <i>Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia</i> . Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. <i>Revista Nor@ndina</i> , 133–140. https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133

Fuente: autor

En diversos países, la evaluación y prevención de la condición de las carreteras es un tema de gran relevancia, y se han creado sistemas automatizados para la inspección de los pavimentos. La Figura 7.4., muestra algunas opciones comerciales instaladas en furgonetas, que facilitan la adaptación de los instrumentos de inspección y permiten colocar los elementos de sincronización o procesamiento en el área de carga del vehículo.

Figura 7.4. Sistemas automáticos de adquisición de datos en pavimentos



Fuente: (Porras-Díaz, Ramón-Suárez, Mejía-Melgarejo, & Parra-Rodriguez, 2014)

Hay dos funciones principales en los dispositivos de los sistemas automáticos para la inspección de pavimentos: localización e inspección del estado de las vías. La localización se realiza mediante el uso de dispositivos como GPS, codificadores rotatorios, giróscopos, acelerómetros y sistemas de navegación inercial. Los sistemas utilizan al menos uno de estos dispositivos para sincronizar la toma de datos y agregar metadatos de localización. En la Tabla 7.4., se presentan algunos sistemas comerciales, aunque los desarrolladores no describen detalladamente los elementos que utilizan. Estos sistemas suelen incluir cámaras digitales para la toma de imágenes y tecnología

láser, inicialmente para la iluminación de la escena con el uso de una cámara de escaneo por línea y, posteriormente, para la reconstrucción tridimensional utilizando la técnica de luz estructurada.

Tabla 7.4. Sistemas comerciales de adquisición de datos automático en pavimentos

Desarrollador, país	Nombre	Dispositivos
CSIRO, Australia	<i>Automated detection of road cracks</i>	• Cámaras digitales de alta velocidad • Reflector especial de luz • Computadores a bordo para detección de daños en tiempo real
G.I.E. Technologies, Canadá	<i>Image capture system</i>	• Cámara digital a color con máxima resolución de 1280x980 • Arreglos de filtros de color • Filtros que previenen la reflexión de la luz en las cámaras • Software para el control del sistema óptico
Inclusión del láser en los sistemas		
Fugro Roadware, Estados Unidos y Canadá	ARAN	• Hasta 6 cámaras digitales de 1920x1080 píxeles • Cámara digital de escaneo por línea • Láseres
YZ Technology, India	<i>Laser RST Portable System</i>	• Sensores láser • Fotocelda
Pathway Services Inc, Estados Unidos	Pathway 3D	• Cámara digital de escaneo por área de alta resolución para captación de imágenes y perfiles tridimensionales de la vía • Proyector de línea láser
Pavementrics, Canadá	<i>Laser Road Imaging System (LRIS)</i>	• Cámara digital de escaneo por línea • Sistema de proyección láser para iluminación
Pavementrics, Canadá	<i>Laser Crack Measurement System</i>	• Cámara digital de escaneo por área de alta velocidad para captación de imágenes y perfiles tridimensionales de la vía • Óptica configurable • Proyector de línea láser
Vectra, Francia	AMAC	• Cámara digital de escaneo por línea • Sistema de proyección láser para iluminación • Sistema para medir un perfil transversal de 4m con 1280 puntos por sección y resolución vertical de 1 mm
W.D.M. Limited, Reino Unido	<i>Road Assessment Vehicles (RAV)</i>	No especifica los equipos que utilizan, sino las medidas que entregan, entre estas: • Rugosidad en la ruta de la rueda izquierda • Textura en la ruta de las ruedas y en el centro • Medida de profundidad por medio de 20 sensores que cubren 3,2m de ancho • Registro de video con imágenes cada 5m

Fuente: (Porras-Díaz, Ramón-Suárez, Mejía-Melgarejo, & Parra-Rodriguez, 2014)

Es importante destacar que la mayoría de los proyectos realizan la integración de múltiples sensores, siendo la mayoría de ellos para la captura de imágenes digitales del pavimento. A pesar del creciente interés en la inspección tridimensional, hay muy pocos trabajos que se centran en esta área en comparación con la cantidad de proyectos dedicados a la adquisición y procesamiento de imágenes.

7.2.1 Cámara digital

La cámara digital es una técnica muy difundida en la detección de problemas en los pavimentos flexibles: los dispositivos disponibles comercialmente adquieren imágenes 2D en el espectro visible de luz. La imagen se captura a través de un sensor fotosensible digital. Después de la adquisición, se utiliza un procesamiento de imagen digital para extraer las características de las fallas en pavimentos analizadas utilizando algoritmos de análisis de imagen: los diferentes daños se separan y clasifican según algunos parámetros, como el ancho, la dirección de propagación y la variación del color de los píxeles. Entre las primeras aplicaciones en la detección de características utilizando imágenes 2D, varios autores probaron el método en baches, obteniendo buenos resultados. Las imágenes se segmentaron primero en regiones de defectos y no defectos, utilizando umbrales basados en la forma del histograma; posteriormente, se analizaron las regiones con características, como para ser clasificadas como posibles baches, mediante operadores morfológicos (Ragnoli et al., 2018). Ver Figura 7.5.

Figura 7.5. Diagrama de captación de imagen



Fuente: autor

La forma y dimensión particulares de los baches hacen que su identificación sea más fácil mediante algoritmos de detección de imagen, incluso cuando se utiliza una baja resolución de la cámara. Al mejorar la resolución de la cámara, incluso la identificación y medición de grietas se convierten en un procedimiento confiable. De hecho, la mayoría de los estudios sobre imágenes 2D muestran que la identificación y clasificación de grietas han llevado a una alta tasa de éxito:

los estudios muestran que la precisión de la medición de grietas puede ser mayor del 95%, con un límite inferior del 70% (Ragnoli et al., 2018).

Un aspecto no tangible de la cámara en el proceso de adquisición de datos es la posibilidad de ser implementada fácilmente en un vehículo equipado con varios sensores y un sistema de posicionamiento para mejorar la productividad del estudio e integrar la componente de información georreferenciada. Sin embargo, algunos factores, como la velocidad del vehículo, la posición y configuración de la cámara, así como factores ambientales, pueden afectar la resolución final de las imágenes y comprometer la detección de las deformaciones.

En la inspección de pavimentos, la mayoría de los vehículos comerciales utilizados están equipados con cámaras que no se utilizan directamente para medir e identificar las deformaciones, sino que se utilizan para asistir a otros dispositivos de medición, como cámaras lineales, triangulación o dispositivos LiDAR (Detección y medición de luz).

7.2.2 Drones o vehículos aéreos no tripulados (UAVs)

Los avances más recientes en inspecciones de pavimentos utilizan el procedimiento de teledetección utilizando vehículos aéreos no tripulados (UAVs), por sus siglas en inglés: Unmanned Aerial Vehicle; y técnicas de procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones, similares a las aplicaciones terrestres. Sin embargo, a cierta altura de vuelo, las resoluciones espaciales de estas imágenes limitan la capacidad para detectar las deformaciones del pavimento, como grietas individuales, debido a que la mayoría de su ancho es inferior a 0,01 m (Zhang, Lippit, Bogus,, & Neville, P, 2016). En estas condiciones, se pueden identificar deformaciones como el desgaste, la fisuración en forma de cocodrilo y la fisuración transversal. Ver Figura 7.6.

Figura 7.6. Vehículos no tripulados (UAVs)



Fuente: (Zakeri et al., 2017)

7.2.3 Cámara de escaneo lineal

La cámara de escaneo lineal es ideal para aplicaciones que requieren tanto altas tasas de adquisición como alta resolución. Una cámara de barrido lineal produce una secuencia de líneas únicas de píxeles para construir una imagen bidimensional del pavimento, la cámara se mueve perpendicular a la línea de píxeles, generalmente por un vehículo terrestre. La cámara de barrido lineal puede asegurar una alta productividad diaria en la fase de inspección, de hecho, una alta frecuencia de cuadro de la cámara (como 28 kHz) permite al vehículo conducir hasta 90 km/h, pero puede resultar en una fase de postprocesamiento y detección de fallas que consume mucho tiempo y costosa.

Las cámaras de barrido lineal se utilizaron principalmente para la detección de grietas a partir de imágenes 2D: la visibilidad de las fallas es inversamente proporcional a la resolución espacial. De hecho, para una cámara que se caracteriza por una resolución igual a 2048 píxeles por línea montada a una altura de 1,80 m, el ancho de grieta visible es de 2 mm. Al aumentar la resolución a 4096, el ancho de grieta visible se reduce a 1 mm (Wang & Smadi, 2011). Una mejora importante en la detección de fallas de alta resolución ha sido la adopción de la tecnología basada en la iluminación láser en 2005, que superó los disturbios de luz solar y sombras. Las soluciones comerciales basadas en esta tecnología son los llamados sistemas de imágenes láser para carreteras (LRIS, por sus siglas en inglés) (Loizos, Scarpas, & Al-Qadi, 2008): pueden funcionar de día o de noche, siempre y cuando el pavimento esté seco. El sistema LRIS utiliza dos cámaras que producen imágenes sincronizadas y parcialmente superpuestas para formar una sola imagen.

7.2.4 Imagen 3D por láser

Varias patologías de la superficie del pavimento son tridimensionales: la dimensión 2D (superficie) y las diferencias de altura (profundidad). Los sensores 3D incluyen una variedad de soluciones tecnológicas, y la mayoría de ellas se basan en perfiles láser en combinación con imágenes. Esta tecnología se ha aplicado ampliamente en el control de calidad en la fabricación, y solo en los últimos años se ha aplicado en el análisis de la superficie del pavimento (Mathavan et al., 2015), (Coenen & Golroo, 2017), (Wang & Smadi, 2011).

Una de las técnicas de reconstrucción 3D más utilizadas se basa en la triangulación, en la cual una línea de láser, o una luz lineal LED como luz auxiliar, proyecta un rayo sobre la superficie de la carretera. Una o más cámaras digitales, realizan el sistema de triangulación, detectando la forma de la proyección de la línea láser sobre el pavimento casi plano.

La imagen 3D por láser tiene el potencial de medir diferentes deterioros en la superficie del pavimento a alta velocidad y en plena automatización: fisuras, deformaciones, baches, parches y desplazamientos pueden ser fácilmente detectados por el sistema. Según varios autores (Zakeri et al., 2017), (Mathavan et al., 2015), (Coenen & Golroo, 2017), (Loizos, Scarpas, & Al-Qadi, 2008), el sistema puede detectar eficazmente las fisuras que tienen un ancho igual o mayor a 2 mm en un entorno de laboratorio controlado y se obtuvieron resultados consistentes bajo diferentes condiciones de iluminación. Esta tecnología es madura y está comercialmente disponible como Sistema de Medición de Fisuras Láser (LCMS).

La resolución longitudinal es una función de la velocidad del vehículo y la tasa de escaneo láser: por ejemplo, al considerar una velocidad de conducción de 60 km/h y una tasa de escaneo igual a 5 kHz, el intervalo de línea de escaneo es igual a 3 mm (Ouyang & Xu, 2013). Además, según, (Coenen & Golroo, 2017), el proceso de detección de grietas se puede mejorar utilizando una cámara 2D de alta resolución. Este sistema tiene como desventaja el alto costo del equipo, y la ventaja de detectar el perfil transversal completo de la carretera mediante el uso de un láser de frecuencia de proyección suficientemente alta y cámaras adecuadas.

7.2.5 Escáner Láser Terrestre (TLS)

Entre las soluciones tecnológicas disponibles comercialmente para la detección de deterioro del pavimento, el escáner láser es uno de los más recientes, de alto rendimiento y precisión. La técnica de escáner láser se basa en la tecnología LiDAR (Detección y Rango de Luz), que permite obtener información tridimensional muy precisa y de alta resolución del objeto escaneado mediante una nube densa de puntos. Se basa en dos principios: tiempo de vuelo y desplazamiento de fase. Los sensores de tiempo de vuelo estiman la distancia entre el objetivo y el centro del instrumento midiendo el tiempo que transcurrió entre la señal láser emitida y la reflejada, mientras que los sensores de desplazamiento de fase se basan en la medición del desplazamiento angular entre la señal emitida y la reflejada. Los sensores de desplazamiento de fase tienen un rango más limitado que los de tiempo de vuelo (<150 m), por otro lado, tienen una frecuencia de adquisición más alta (más de un millón de puntos por segundo). La precisión obtenible con instrumentos de tiempo de vuelo es de entre 3 y 6 mm @ 100 m, valores que aumentan con la distancia (Crosilla & Dequal, 2006). Los Escáneres Láser Terrestres Móviles, también comúnmente llamados Escáneres Láser Móviles (MLS), son particularmente interesantes; permiten la adquisición de datos 3D mediante uno o más escáneres que se montan en una plataforma móvil (vehículos, barcos, trenes); esta técnica reduce considerablemente los tiempos y costos de adquisición en comparación con las técnicas tradicionales. Los rangos típicos de precisión 3D para el sistema MLS en el caso de la superficie del pavimento son de 1 cm y la densidad de puntos es mayor a mil puntos por metro cuadrado. La densidad de la nube de puntos depende de la velocidad de desplazamiento de la plataforma móvil, la resolución angular del sensor y la velocidad de rotación del espejo láser: equilibrando estos parámetros, se puede mejorar la precisión de la nube de puntos 3D resultante. Las aplicaciones de detección de defectos mediante la nube de puntos de escáner láser se ocupan del enfoque automatizado para detectar la aspereza del camino y los baches.

7.3 Análisis de resultados

El primer paso de la presente revisión ha sido la clasificación de los deterioros comunes en términos de comodidad e impacto en la seguridad, con el fin de lograr un efectivo PMS. Para satisfacer la necesidad de información, se han considerado las soluciones tecnológicas más populares para clasificarlas según su idoneidad en la captura de datos del pavimento de la carretera.

El análisis muestra que los deterioros incluidos en el grupo de fallas (fatiga, en bloques, en los bordes, longitudinal y transversal, por reflexión en las juntas y deslizamiento) son fácilmente reconocibles por todas las tecnologías consideradas, excepto en casos de baja severidad. Los deterioros clasificados en el grupo de deformación viscoplástica (baches y hundimientos, deformaciones, ondulaciones, depresiones, baches, ondulaciones, desnivel en el carril/borde, y hundimiento) son perfectamente detectados por el escáner láser, y también se obtienen buenos resultados al utilizar la triangulación láser, debido a que la información requerida es diferente en altura. Los deterioros superficiales (sangrado, agregado pulido y desmoronamiento) detectados por cámara, escaneo de línea y tecnología de triangulación láser obtienen buenos resultados en términos de precisión, mientras que el escáner láser no es eficiente para este grupo de deterioros. Los deterioros del último grupo (parcheo, paso a nivel y alcantarilla) son fácilmente detectados por todas las soluciones tecnológicas consideradas en el presente. Este marco puede abordar el diseño y planificación de la encuesta a partir de la necesidad de información para el PMS.

Por otra parte, la recopilación de datos es una etapa crucial en los sistemas de gestión de pavimentos, ya que proporciona información para todo el ciclo. A pesar de los beneficios en seguridad, eficiencia y objetividad que podrían aportar los métodos automáticos, la recolección manual sigue siendo el método más utilizado debido a la dificultad de aceptación de sistemas que reemplacen la recolección realizada por expertos en campo. Los esfuerzos de investigación para automatizar la adquisición de datos han dado lugar al desarrollo de sistemas completos, con el uso predominante de cámaras digitales para la captación de imágenes.

Aunque no hay una tendencia clara en el tipo de cámara utilizada, se deduce que los desarrolladores han optado por adquirir imágenes digitales con cámaras de escaneo por línea, a veces con la mejora de la calidad mediante el uso de láseres como fuente de iluminación, para la inspección de pavimentos.

Los problemas de sombras y aberraciones en las imágenes y la necesidad de contar con más información sobre la superficie han despertado el interés de los investigadores en el desarrollo de sistemas que utilicen métodos de reconstrucción tridimensional para la inspección de daños. Aunque se han realizado desarrollos en este ámbito, no han tenido la misma aceptación que las imágenes digitales, probablemente debido a la mayor cantidad de datos que deben procesarse y

almacenarse. Por lo tanto, es importante investigar la compresión de los datos desde la adquisición para la evolución de los sistemas de inspección automática de pavimentos.



8 CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad de los pavimentos flexibles es un proceso crítico en la construcción y mantenimiento de carreteras y vías, que afecta directamente la seguridad de los usuarios y la economía de los países. Las metodologías tradicionales han sido ampliamente utilizadas en todo el mundo, pero presentan limitaciones y desventajas que pueden afectar su precisión y eficacia. Por otro lado, las tecnologías emergentes ofrecen nuevas oportunidades para mejorar la evaluación de los pavimentos flexibles, mediante la aplicación de tecnologías avanzadas como el escaneo láser terrestre, el análisis de imágenes con drones y cámaras, la medición de velocidades de ondas de corte, el análisis de señales sónicas de superficie y el análisis de vibración ambiental.

En la presente revisión bibliográfica, se ha demostrado que las tecnologías emergentes ofrecen ventajas significativas en comparación con las metodologías tradicionales, como mayor precisión, eficiencia, confiabilidad, facilidad de uso y menor costo. Además, estas tecnologías son cada vez más accesibles y fáciles de implementar en diferentes contextos, incluyendo los países en desarrollo como Colombia.

En particular, se ha identificado que el escaneo láser terrestre, el análisis de imágenes con drones y cámaras y la medición de velocidades de ondas de corte son las tecnologías emergentes más representativas y con mayor potencial de aplicación en la evaluación de los pavimentos flexibles en Colombia. Estas tecnologías ofrecen ventajas como la capacidad de medir en tiempo real y en una amplia área, lo que permite una evaluación más rápida y detallada de la calidad del pavimento. Además, estas tecnologías no requieren una interrupción significativa del tráfico, lo que reduce el impacto en los usuarios y los costos asociados.

Es importante destacar que la implementación de estas tecnologías emergentes requiere una planificación adecuada y una capacitación adecuada del personal, para asegurar su correcto uso y optimizar su eficacia. Además, es necesario tener en cuenta que la evaluación de la calidad de los pavimentos flexibles debe ser un proceso continuo y sistemático, que permita detectar y corregir oportunamente los daños y desgastes del pavimento, antes de que se conviertan en problemas mayores y costosos.

En cuanto a las recomendaciones de mejora, se sugiere fortalecer la investigación y el desarrollo de tecnologías emergentes para la evaluación de los pavimentos flexibles, con el fin de mejorar su precisión y eficiencia y reducir su costo. Además, se debe promover la colaboración entre las instituciones públicas y privadas para compartir información y experiencias en la evaluación de los pavimentos flexibles, lo que permitiría una mejor gestión y mantenimiento de las carreteras y vías en Colombia. En este sentido, se sugiere fomentar la creación de redes de colaboración y la implementación de políticas y programas de capacitación para mejorar la calidad de la evaluación de los pavimentos flexibles en todo el país.

Por otro lado, la recolección de datos constituye etapa crucial en los sistemas de gestión de pavimentos, ya que es la base de todo el ciclo. Sin embargo, es difícil reemplazar la recolección manual realizada por expertos en campo, a pesar de los beneficios potenciales de los métodos automáticos en términos de seguridad, eficiencia y objetividad. La investigación en la automatización de la adquisición de datos ha llevado al desarrollo de sistemas completos que utilizan principalmente cámaras digitales para la captura de imágenes. Aunque no hay una tendencia clara en el uso de un tipo específico de cámara, parece que para la inspección de pavimentos los desarrolladores prefieren adquirir imágenes digitales con cámaras de escaneo por línea, a veces con el uso de láseres para mejorar la calidad de la iluminación y resolver problemas de sombras y aberraciones en las imágenes. Los investigadores también están interesados en el desarrollo de sistemas de reconstrucción tridimensional para la inspección de daños, pero estos sistemas aún no han sido tan populares como las imágenes digitales debido a la gran cantidad de datos que generan y a los desafíos de almacenamiento y procesamiento.

UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

9 BIBLIOGRAFIA

- Abukhalil, Y., & Smadi, O. (2022). A Bootstrap-Based Integer Programming Algorithm for Budget Allocation in Pavement Management Systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 28(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000663](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000663)
- Alfonso-Barrera, J. D. (2019). *Análisis de datos en la auscultación de pavimentos empleando equipos de prueba no destructiva* [Tesis de Pregado]. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. .
- Al-Neami, M., Al-Rubaei, R., & Kareem, Z. (2018). Assessment of Al-Amarah street within the Al-kut city using pavement condition index (PCI) and GIS technique. *Construction and Environmental Engineering*, 162. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816201033>
- Andrade, D., Hernández, K. D., & Salomón, M. L. (2020). *Revisión de las metodologías de evaluación y tipos de rehabilitación de las patologías presentes en pavimentos flexibles* [Tesis de pregrado]. Universidad Cooperativa de Colombia.
- ASTM D6433-07. (2008). *Standar Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. Obtenido de Designation: D 6433-07.
- ASTM D6433-18. (2018). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. ASTM International.
- ASTM E1364-95. (2017). *Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method*.
- ASTM International. (2020). *D6433-20 "Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavements Condition Index Surveys"*.
- Barros-Lozano, C. S., & Gómez-Hernández, A. (2017). *Análisis superficial y metodologías de pavimentos para el mantenimiento de vías terciarias del municipio del Espinal -*

- Tolima* [Tesis de Pregrado]. Universidad Piloto de Colombia. Seccional del Alto Magdalena.
- Benavides Arbulú, L. E. (2020). Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles. *Revista Nor@ndina*, 133–140. <https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133>
- Bennett, C. R., De Solminihac, H., & Chamorro, A. (2006). Data Collection Technologies for Road Management . *World Bank. Roads and Rural Transport Thematic Group*, 30.
- Castro Chuyo, L. D. K., Muñoz Pérez, S., Paucar Aguilar, J. J., & Ramirez Silva, R. V. (2021). Tecnologías empleadas en la evaluación de pavimentos e impacto que han generado. *Llamkasun*, 2(1), 29–44. <https://doi.org/10.47797/llamkasun.v2i1.29>
- Coenen, T. B. J., & Golroo, A. (2017). A review on automated pavement distress detection methods. *Cogent Engineering*, 4(1), 1374822. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1374822>
- EADIC. (2015). *Pavimento Rígido vs Pavimento Flexible en Latinoamérica*. <https://eadic.com/blog/entrada/pavimento-rigido-vs-pavimento-flexible-en-latinoamerica/#:~:text=A%20pesar%20de%20que%20este,entre%2020%20a%2030%20a%C3%B1os>.
- Escobar-Rojas, J. L., Gómez-Barrera, H., & Santana-Ramírez, L. E. (2010). *Manual para el mantenimiento de carreteras* [Tesis de especialización]. Universidad Militar Nueva Granada.
- Espinosa-Rodríguez, D. A. (2009). *Guía de mantenimiento para Pavimentos Flexibles Asfálticos de Vías Locales de Bogotá* [Tesis de Pregrado]. Universidad de La Salle.
- Gadha Gilang Kencana, F., Setyawan, A., & Syafi'i. (2018). System model for physical conditions of road components in Magetan district. *MATEC Web of Conferences*, 195, 04005. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819504005>
- Gamboa-Beltrán, G. A. (2019). *Análisis técnico del deterioro del pavimento de las concesiones viales de Colombia conforme a los parámetros de evaluación establecidos*

- en los contratos de concesión para la evaluación de modelos de pavimentos.* [Tesis de Maestría]. Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Civil.
- García-Salazar, D. R., & Silva-Castillo, D. A. (2018). *Análisis Comparativo de metodologías de evaluación VIZIR y PCI (Parte B), aplicado a la estructura de pavimento de una vía urbana, en el barrio Chicó Norte (Localidad Chapinero).* Universidad Militar Nueva Granada.
- GEC. (2003). *The Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS) SN-640925B.*
- Gillespie, T. D. P., Queiroz, C. A. V., & Sayers, M. V. (1986). *The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements.*
- González Fernández, H., Ruiz Caballero, P., & Guerrero Valverde, D. (2019). Propuesta de metodología para la evaluación de pavimentos mediante el Índice de Condición del Pavimento (PCI). *Ciencia En Su PC*, 1(1), 58–72. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181358738015>
- Instituto de Desarrollo Urbano IDU, & INVIAS. (2021). *Malla Vial. Información de interés general sobre el mantenimiento que se hace de manera permanente a malla vial de la ciudad.*
- INVIAS. (2008). *Guía metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras.*
- INVIAS. (2016). *Manual de mantenimiento de carreteras. Especificaciones generales de mantenimiento de carreteras.*
- INVIAS. (2022). *Metodología para la determinación y calificación del estado de la red vial.*
- INVIAS. (2023, January 24). *Estado de la Red Vial.* 2023. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>

- INVIAS, & Universidad Nacional de Colombia. (2006). *Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Convenio Interadministrativo 0587-03.*
- Istruzioni Sulla Pianificazione Della Manutenzione Stradale. (1988). *Instruction for Road Maintenance Planning CNR BU N.125/88.*
- Kravcovas, I., Vaitkus, A., & Kleizienė, R. (2020). Comparison of Pavement Performance Models for Urban Road Management System. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(3), 111–129. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.487>
- LCPC. (1991). *VIZIR, méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins.*
- Logistic Cluster. (2023, June 8). *Colombia Red Carretera*. <https://dlca.logcluster.org/es/23-colombia-red-carretera#:~:text=La%20red%20vial%20en%20Colombia,a%20carga%20de%20los%20municipios>).
- Loprencipe, G., & Pantuso, A. (2017). A Specified Procedure for Distress Identification and Assessment for Urban Road Surfaces Based on PCI. *Coatings*, 7(5), 65. <https://doi.org/10.3390/coatings7050065>
- Loprencipe, G., Pantuso, A., & Di Mascio, P. (2017). Sustainable Pavement Management System in Urban Areas Considering the Vehicle Operating Costs. *Sustainability*, 9(3), 453. <https://doi.org/10.3390/su9030453>
- LPCC. (1998). *Catalogue des Dégradations de Surface des Chaussées.*
- Macea-Mercado, L. F., Morales, L., & Márquez-Díaz, L. G. (2016). Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(2), 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.007>
- Martínez-Alarcón, C. A. (2015). *Análisis del Ciclo de Vida de los Pavimentos Asfálticos* [Tesis de Especialización en Ingeniería de Pavimentos]. Universidad Militar Nueva Granada.

- Mathavan, S., Kamal, K., & Rahman, M. (2015). A Review of Three-Dimensional Imaging Technologies for Pavement Distress Detection and Measurements. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(5), 2353–2362. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2428655>
- Mendoza-Castro, J. D. (2021). *Análisis comparativo de cuatro metodologías de evaluación superficial de pavimentos flexibles en sectores típicos de las rutas a cargo de la administración vial del INVIAS Territorial Meta, Módulo 1, Grupo 3* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Miller, J. S., & Bellinger, W. Y. (2014). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program*.
- Ministry of Transportation. (2016). *Manual for Condition Rating of Flexible Pavements*.
- Miranda-Rebolledo, R. J. (2010). *Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos* [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfcim672d/doc/bmfcim672d.pdf>
- Montejo Fonseca, A. (1998). *Ingeniería de pavimentos para carreteras* (2nd ed.). Universidad Católica de Colombia.
- Můčka, P. (2017). Road Roughness Limit Values Based on Measured Vehicle Vibration. *Journal of Infrastructure Systems*, 23(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000325](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000325)
- Ocaña-Ortiz, F. A., & Cruz-Rubio, O. F. (2019). *Evaluación estructural de pavimentos flexibles contruidos en la localidad de Usme utilizando el deflectómetro de impacto o FWD* [Universidad Santa Tomás]. <http://hdl.handle.net/11634/16535>
- Oliveira, H., & Correia, P. L. (2013). Automatic Road Crack Detection and Characterization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(1), 155–168. <https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2208630>
- Oliveira, H., & Correia, P. L. (2014). CrackIT - An image processing toolbox for crack detection and characterization. *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 798–802. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2014.7025160>

- Pallasco-Catota, J. L. (2018). *Evaluación y propuesta de mantenimiento del pavimento flexible de la Avenida Quevedo en Santo Domingo de los Tsáchilas*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Portafolio. (2022, July 27). *El 19.1% de las vías en Colombia están sin pavimentar*. <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/el-19-1-de-las-vias-de-colombia-estan-sin-pavimentar-568772>
- Ragnoli, A., De Blasiis, M., & Di Benedetto, A. (2018). Pavement Distress Detection Methods: A Review. *Infrastructures*, 3(4), 58. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058>
- Real, D. F., & Montaña, M. G. (2021). *Evaluación estructural de pavimentos flexibles considerando la circulación de vehículos de carga tipo bitrén* [Tesis Especialización]. Universidad Católica de Colombia.
- Shah, Y. U., Jain, S. S., Tiwari, D., & Jain, M. K. (2013). Development of Overall Pavement Condition Index for Urban Road Network. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 332–341. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.126>
- Shahin, M. Y. (2005). *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/b101538>
- Shon, H., Cho, C.-S., Byon, Y.-J., & Lee, J. (2022). Autonomous condition monitoring-based pavement management system. *Automation in Construction*, 138, 104222. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104222>
- Shtayat, A., Moridpour, S., Best, B., & Rumi, S. (2022). An Overview of Pavement Degradation Prediction Models. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2022/7783588>
- Sierra-Díaz, C. C., & Rivas-Quintero, A. F. (2016). *Aplicación y comparación de las diferentes metodologías de diagnóstico para la conservación y mantenimiento del tramo PR00+000 - PR01+020 de la vía al llano (DG 78 BIS SUR - CALLE 84 SUR) en la UPZ Yomasa* [Tesis de pregrado]. Universidad Católica de Colombia.

- Sinha, K. C., Labi, S., & Agbelie, B. R. D. K. (2017). Transportation infrastructure asset management in the new millennium: continuing issues, and emerging challenges and opportunities. *Transportmetrica A: Transport Science*, 13(7), 591–606. <https://doi.org/10.1080/23249935.2017.1308977>
- Tech Transportation Institute, PMS Pavement Management Services Ltd., & Ireland Department of Transport Tourism & Sport. (2015). *Development and implementation of a simplified system for assessing the condition of irish regional and local roads. In Proceedings of the 9th International Conference on Managing Pavement Assets, Virginia Tech Transportation Institute (VTTI).*
- Tello-Cifuentes, L., Aguirre-Sánchez, M., Díaz-Paz, J. P., & Hernández, F. (2021). Evaluación de daños en pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales. *TecnoLógicas*, 24(50), e1686. <https://doi.org/10.22430/22565337.1686>
- The Ohio Department of Transportation. (2006). *Pavement Condition Rating System.*
- Tighe, S., Li, N., Falls, L. C., & Haas, R. (2000). Incorporating Road Safety into Pavement Management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1699(1), 1–10. <https://doi.org/10.3141/1699-01>
- Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UMV). (2023). *Cifras mantenimiento vial en Bogotá.*
- Vásquez-Torres, L. C., & Ospina-Gómez, G. C. (2010). *Comparación y análisis de las metodologías para la calificación y cuantificación de daños en pavimentos asfálticos* [Tesis de Maestría]. Universidad Santo Tomás.
- Villegas-Marín, E. (2020). *Evaluación superficial mediante el método VIZIR para mejorar el pavimento flexible de la carretera Celendín-Balsas, Cajamarca-2020* [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Zakeri, H., Nejad, F. M., & Fahimifar, A. (2017). Image Based Techniques for Crack Detection, Classification and Quantification in Asphalt Pavement: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 24(4), 935–977. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9194-z>

10 ANEXO A

	Autor	Título	Año	País	Captura de información	Resumen	Tipo de documento
1	Pereira, L.;Silva, C.& Fontenele, H.	Escala visual para evaluación de pavimentos urbanos: Una validación en oficina	2018	Brazil	Inspección visual	Para ese estudio se realizó el analisis visual compuesta por fotografías para verificar la condicion del pavimento	Artículo academico
2	Porras, H.;Ramón, J.; Mejía, Y. & Parra, J.	Escala visual para evaluación de pavimentos urbanos: Una validación en oficina	2014	Colombia	Estado del arte	En este documento se revisa la literatura de metodos manuales y automaticos para la inspeccion de la condicion del pavimento	Artículo academico
3	Peña, M. & Zárate, B.	Empleo de VANT para determinar fallas superficiales en pavimentos flexibles	2020	Ecuador	Ortoimagenes (SIG) e inspección visual	Se evaluan fallas superficiales usando vehiculos aereos no tribulados y comparan los resultados con los datos tomados en campo. Se comparan y se concluye que el uso de VANT es mejor.	Artículo academico
4	Cango, L. & Zárate, B.	Evaluación del desgaste de pavimento flexible mediante el uso de fotogrametría de corto alcance.	2021	Ecuador	Fotogrametría de corto alcance (FCA)	Este artículo analiza una técnica nueva, denominada fotogrametría de corto alcance (FCA), para estimar el desgaste de la capa de rodadura de un pavimento flexible en la vía Loja-Catamayo, mediante una cámara portátil sobre una estructura metálica. La investigación evaluó los perfiles de los modelos digitales de elevación (MDE), de manera milimétrica; así, con la diferencia de los perfiles de los MDE y con el error cuadrático medio, se logró estimar el desgaste producido en un periodo no mayor a un mes. Los resultados fueron muy alentadores, ya que, numéricamente, se comprobó que el mayor desgaste se dio en el carril de mayor circulación de vehículos pesados, que fue de aproximadamente 1 mm. Por ello, el método de FCA es válido para una evaluación periódica del estado de la capa de rodadura de pavimento flexible.	Artículo academico

5	OBLITAS ET AL	Índice de regularidad internacional e índice de condición de pavimento para definir niveles de serviciabilidad de pavimentos	2021	Colombia	IRI Y PCI	La presente investigación constituye una revisión sistemática de la literatura sobre los métodos de evaluación de los pavimentos flexibles, IRI (Índice de rugosidad internacional) y PCI (índice de condición de pavimento) para determinar los niveles de serviciabilidad en pavimentos flexibles, durante los últimos 15 años. Se empleó una búsqueda minuciosa de fuentes bajo criterios de inclusión y exclusión, a partir de los cuales se seleccionaron 29 artículos científicos indexados a bases de datos reconocidas. A través de una matriz de análisis de información se procedió a trabajar exclusivamente con 20 sobre los cuales se construyeron categorías temáticas en torno a las que plantean los resultados de la investigación. Este proceso permitió identificar los principales hallazgos, haciendo comparaciones entre los resultados y puntos de vista distintos o semejantes de autores a fin de extraer conclusiones. Entre los principales resultados se encontró que es necesario tener métodos de evaluación superficial de pavimentos, para conocer el estado actual de estos y no ejecutar actividades sin un criterio técnico. Por ello, utilizar métodos como el IRI y PCI resulta de suma importancia para determinar las características actuales de los pavimentos, para la toma de decisiones respecto al mantenimiento, reconstrucción y rehabilitación de las vías, logrando tener un sistema adecuado de gestión de infraestructura de pavimentos, invirtiendo los recursos de forma efectiva.	Artículo académico
6	OLAYA, RAMOS	Evaluación superficial del pavimento flexible del Paseo Turicarami, Sullana - Piura utilizando tecnología VANT	2021	Peru		La presente tesis tuvo como objetivo determinar la influencia del uso de la Tecnología VANT en la Evaluación Superficial del Pavimento Flexible del Paseo Turicarami, Sullana. La investigación fue de tipo Aplicada, Experimental. La población consistió en los 600 m de longitud de vía "Paseo Turicarami" de Sullana, y se trabajó una muestra censal. La técnica empleada fue la observación y como instrumento se empleó un dron DJI Mavic 2 Pro. El procesamiento de información se realizó con el programa Agisoft PhotoScan Professional, y para determinar la condición del pavimento (PCI) se empleó el software EvalPav del MTC. Se concluyó que la Tecnología VANT influye de manera positiva ya que permitió identificar las fallas, identificar el nivel de severidad de los daños encontrados (excepto Pulimiento de agregados) y permitió determinar el estado de conservación del Pavimento Flexible los cuales fueron: para la sección 1 un PCI de 20.5 (Muy pobre); la sección 2 un PCI de 80.5 (Muy bueno); la sección 4 un PCI de 85 (Excelente), la sección 5 un PCI de 88 (Excelente), la sección 6 un PCI de 37 (Pobre), la sección 8 un PCI de 89 (Excelente) y la sección 9 un PCI de 50 (Regular).	Trabajo de grado
7	NIÑO	Análisis comparativo de fallas en pavimento flexible mediante el método PCI usando VANT, Av. Túpac Amaru - Carabayllo - Lima 2021	2021	Peru		El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar el análisis comparativo de fallas en pavimento flexible mediante el método PCI usando VANT en la Av. Túpac Amaru-Carabayllo. La investigación es de tipo aplicada nivel descriptivo-explicativo, de acuerdo al diseño metodológico es no experimental de corte transversal. La muestra de la investigación fue la Av. Túpac Amaru desde la Av. San Felipe hasta la Av. Chimpú Oclo, que consta de una longitud de 1 kilómetro. Los resultados se determinaron realizando el Método PCI tradicional de lo cual se evaluó 10 unidades de muestras y los resultados obtenidos por el VANT (vehículo aéreo no tripulado) se evaluó un total de 25 unidades de muestras. Se realizó la comparación de estos dos métodos y tuvo como conclusión el estado de la Av. Túpac Amaru Pobre en las dos evaluaciones; por ello, la aplicación del vehículo aéreo no tripulado sería una herramienta adecuada para la inspección de fallas en pavimentos ya que se realizó en un menor tiempo y con un menor costo.	Trabajo de grado
8	QUISPE	Metodología PCI empleando VANT, para determinar la condición superficial del pavimento flexible en la Avenida José María Arguedas San Jerónimo, 2021	2021	Peru		La presente investigación tuvo como objetivo general explicar cómo la metodología PCI empleando VANT, determina la condición superficial del pavimento flexible en la Avenida José María Arguedas-San Jerónimo, empleando una metodología de tipo aplicada, con diseño no experimental, prospectivo, transversal y analítico, de nivel explicativo y enfoque cuantitativo. Se logró como resultados una ortofoto proveniente del procesamiento fotogramétrico que permite realizar un inventario de fallas y determinar un PCI de 55 que refleja una condición superficial de pavimento "regular", se plantea un mantenimiento correctivo intensivo con actividades de sellado superficial y rencarpetado delgado; mientras una evaluación tradicional establece un PCI de 54 con condición superficial "regular", realizando la prueba "t" se revela un P-valor de 0.08 mayor a 0.05 (α), revela que no existe diferencia significativa en las medias del PCI empleando VANT y PCI tradicional, por ende existe un alto grado de confiabilidad. Se concluye, la metodología PCI empleando VANT es confiable ya que determina valores similares a una evaluación tradicional, permitiendo una recopilación de datos característicos y coadyuva a la optimización de tiempos de trabajo, personal designado, costos de seguridad sin la necesidad de generar interrupciones en el flujo vehicular.	Trabajo de grado

9	PALIZA,CHUYACAMA	Evaluación del estado actual del pavimento flexible mediante la metodología tradicional del PCI y la metodología VANT en la Carretera Transversal 28G (Cusco - Pisac)	2022	Peru	El presente tema de investigación tiene como objetivo la evaluación del estado actual del pavimento flexible de la carretera 28G (Cusco – Pisac) con una longitud total de 32+360 km, para lo cual se consideró el uso de la metodología tradicional del PCI y la metodología VANT, basadas en la normativa ASTM D6433 demostrando así las diferencias entre ambas metodologías verificando cual es más eficiente. Siendo la metodología VANT, una nueva alternativa que aplica el uso de drones para evaluación de pavimentos, se evaluó el nivel de confiabilidad de los resultados obtenidos de esta, frente a la metodología tradicional del Pavement Condition Index (PCI). Para la evaluación de la carretera 28G se obtuvo 16 unidades de muestra representativas elegidas de forma aleatoria y 5 unidades muestra adicionales elegidas en campo, consideradas en ambas metodologías. Para verificar el estado de condición de pavimento mediante la metodología tradicional del PCI, se realiza un inventario de fallas correctamente dimensionadas de cada unidad de muestra, utilizando fichas de recolección de datos que brinda la norma ASTM D6433. Mientras que para la metodología VANT se realiza el inventario de fallas mediante imágenes georreferenciadas obtenidas con el dron Mavic 2 Pro, siendo estas procesadas en gabinete con el uso del software Agisoft Metashape obteniendo ortofotos donde se visualiza y dimensiona los tipos de fallas encontradas. Mediante la metodología tradicional se obtuvo un PCI promedio de 45.80, presentando un grado de condición regular. Mientras que para la metodología VANT se obtuvo un PCI promedio de 46.81, presentando un grado de condición también regular. Se demuestra que con 95% de confiabilidad, no existe una diferencia significativa entre ambos resultados. Y al mismo tiempo se verifica que la metodología VANT es una alternativa más eficiente frente a la metodología tradicional del PCI.	Trabajo de grado
10	RIOS ET AL	Revisión de métodos para la clasificación de fallas superficiales en pavimentos flexibles	2020	Colombia	El estado de la infraestructura vial impacta el entorno social, económico y político de una nación. La evaluación de la condición superficial del pavimento es esencial para planificar intervenciones oportunas y eficaces. Las acciones oportunas evitan sobre costos de operación, impiden el deterioro no controlado y disminuyen los inconvenientes operacionales y de seguridad. El problema expuesto plantea la inquietud de estudiar alternativas para evaluar el estado del pavimento, por lo cual un gran número de investigaciones sobre detección automática de fallas superficiales en pavimentos flexibles a través de técnicas de procesamiento de imágenes han sido desarrolladas. El objetivo de este artículo es revisar y analizar estos aportes. Sobre la base de la revisión, se concluyó que el rendimiento de este tipo de sistemas está determinado por dos factores: la recopilación de los datos y su procesamiento. El análisis presentado se despliega en función de estos factores. Se considera oportuno el desarrollo de sistemas que aprovechen las cualidades de diferentes sensores en la adquisición de datos y que integren la detección y clasificación de variedad de fallas incluyendo datos de severidad.	Trabajo de grado
11	FERNANDEZ ET AL	Análisis comparativo entre los programas Agisoft PhotoScan y Pix4Dmapper para la identificación de fallas en pavimento flexible usando Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTS)	2021	Bolivia	El objetivo del presente artículo es comparar los ortomosaicos obtenidos en los programas Pix4Dmapper y Agisoft Photoscan, considerando los aspectos técnicos y el error en la detección de defectos en pavimento flexible. La metodología se desarrolló en tres etapas: selección de un tramo vial con deterioro, identificando seis defectos; toma de datos en campo y de forma digital (VANT), para este último se consideró un horario (10 a.m.) y tres alturas (20, 30 y 40 m), y procesamiento digital de las imágenes en ambos programas. Los resultados muestran que la calidad de los ortomosaicos generados es semejante y, en la detección de errores, se reporta que no existe diferencias estadísticamente significativas entre las medias. Si bien ambos programas proporcionan resultados similares y permiten la detección de defectos en pavimento flexible, el programa Pix4Dmapper es más eficiente en tiempo de procesamiento y tamaño de archivo.	Artículo academico

12	FIESTAS, MERINO	Cálculo del índice de condición del pavimento flexible a la Av. Don Bosco - Piura usando drones	2020	Peru		La tesis tiene como objetivo determinar el estado del pavimento flexible en la Av. Don Bosco, mediante el método del Pavement Condition Index (PCI), haciendo uso de vehículos aéreos no tripulados con el fin de agilizar los procesos de inspección. Asimismo, se reconocen las fallas en los 2054 m. de pista de la avenida y se desarrollan propuestas de mantenimiento. Para la evaluación del tramo seleccionado, se dividió en 2 calzadas, donde cada calzada presentaba 3 tramos de inspección y cada tramo se divide en unidades de muestra. En tanto, mediante el vuelo del dron, se realizó la toma de imágenes de la vía que, posteriormente, son llevadas a un procesamiento para una inspección visual en gabinete, logrando identificar las fallas. Con la información obtenida, se determinó un valor de PCI promedio para cada tramo de inspección y para cada calzada, obteniéndose como resultado que, el tramo seleccionado en la avenida presenta un PCI ponderado igual a 68 (calzada 1 y calzada 2), lo que corresponde a un estado de pavimento flexible bueno. Finalmente, se concluye que en la calzada 1 se debe aplicar reparaciones para elevar su PCI, puesto que se encontraron varias fallas estructurales que son las que más afectan al pavimento y la gran mayoría presentan un valor de deducción (VD) elevado; mientras que, la calzada 2 se encuentra apropiada para el tránsito vehicular (sus fallas contaban con un VD muy bajo y cada unidad de muestra en excelentes condiciones).	Trabajo de grado
13	SOTO	Condición superficial de pavimentos flexibles determinados mediante métodos convencionales empleando un vehículo aéreo no tripulado, carretera anexo Fátima, Piura 2020	2020	Peru	PCI y Vizir	El problema que viene ocurriendo es la incomodidad del tránsito vehicular debido al deterioro superficial de los pavimentos flexibles en nuestro departamento, Así mismo, se indica la vía de acceso que conecta a los centros poblado Nomara, Fátima, 31 de octubre y Miraflores, La huaca, Piura. Cabe agregar que nuestra entidad pública carece de un plan de gestión para la conservación de vías urbanas. Este problema incremento después del fenómeno del niño costero (2017) suscitadas en el norte del Perú. Siendo las lluvias una de las principales causas de los deterioros de los pavimentos flexibles. Se fija como objetivo. Condición superficial de pavimentos flexibles determinados mediante los métodos convencionales empleando un vehículo aéreo no tripulado carretera anexo Fátima, Piura 2020. Como metodología de investigación se aplicó el método científico, tipo aplicada, nivel explicativo, diseño, experimental puro. Se obtuvo como resultado condición superficial del pavimento en excelente estado según PCI, Marginal mostrado por VIZIR.	Trabajo de grado
14	GARCIA, SILVA	Análisis comparativo de metodologías de evaluación VIZIR y PCI (Parte B), aplicado a la estructura de pavimento de una vía urbana, en el barrio Chicó Norte (localidad Chapinero)	2018	Colombia	PCI y Vizir	El trabajo se desarrolló con el fin de Evaluar la sección de vía analizada por el método PCI, Evaluar la sección de vía analizada por el método VIZIR, Generar una caracterización de condiciones y daños en el pavimento de los tramos de vía analizados y Catalogar los tipos de daños existentes en el tramo de vía analizado de acuerdo a los sistemas de clasificación VIZIR y PCI.	Trabajo de grado
15	CRUZ	Evaluación de pavimento flexible aplicando métodos de inspección visual – planteamiento de medidas preventivas o correctivas en la zona calle 8 entre carreras 3 y 3a del municipio de Cachipay – Cundinamarca	2018	Colombia	PCI y Vizir	Los métodos de inspección visual de pavimentos flexibles VIZIR y PCI son procedimientos aplicados para la determinación del deterioro de carreteras a partir de la observación de la condición superficial y así establecer las medidas preventivas o correctivas que se deberían aplicar al tramo en estudio, en el caso del deterioro observado en la urbanización Camino Real del municipio de Cachipay Cundinamarca, cada método describe un nivel de severidad del deterioro para así poder determinar las medidas que más se ajusten a la solución de la problemática de la vía con el planteamiento de medidas correctivas.	Trabajo de grado

16	CRUZ, GUTIERREZ	Evaluación Superficial de Vías Urbanas empleando Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT)	2019	Costa Rica	PCI	Este trabajo de investigación presenta una metodología alternativa de gestión de pavimentos en vías urbanas, basado en la evaluación superficial del pavimento mediante el uso de imágenes georreferenciadas, obtenidas por un vehículo aéreo no tripulado (VANT) que se procesan generando un ortomosaico y un modelamiento en 3D de alta resolución, que se utiliza para realizar la evaluación superficial por el Método Pavement Condition Index (PCI). Finalmente, con los resultados obtenidos se logra reducir significativamente los tiempos de inspección y costos de evaluación optimizando los recursos de los gobiernos municipales. Además, permite a la entidad determinar los costos de mantenimiento o rehabilitación de tal manera de conservar en buen estado los pavimentos urbanos.	Artículo academico
17	MARTINEZ, LIMONGUIELLO	Empleo de VANT para el control del IRI en pavimentos flexibles	2022	Italia	IRI	El trabajo se centra en tres objetivos fundamentales, el primero consiste en determinar el IRI en pavimentos flexibles mediante el empleo de diferentes técnicas de fotogrametría digital. Como segundo objetivo se pretende valorar la precisión de las técnicas de fotogrametría digital para la determinación del IRI en pavimentos flexibles. Por último, estos resultados se compararían con los obtenidos mediante el método de Escaneo Láser Terrestre para así analizar la precisión de los resultados y determinar a qué nivel de precisión se pueden emplear.	Trabajo de grado
18	CARDOSO ET AL	Uso de vehículo aéreo no tripulado (VANT) en la identificación de falla superficial en pavimento asfáltico	2017	Brazil	Modelo Digital de superficie	La presente investigación tuvo el propósito de desarrollar un procedimiento alternativo e innovador para identificar las manifestaciones patológicas superficiales en pavimento asfáltico de un tramo de vía identificado como TO-050, en Palmas - Tocantins. Como herramienta se utilizó un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), softwares para plano de vuelo y procesamiento de imágenes, mosaicos de ortofotos y Modelo Digital de Superficie (MDS) del área en estudio. Por medio de la interpretación visual de los productos generados fue posible identificar las manifestaciones patológicas en su variedad confrontando datos obtenidos por medio de las imágenes con datos de inspecciones en sitio. Aun cuando presenta un elevado potencial de reconocimiento de áreas comprometidas, hay que destacar que la inestabilidad del vehículo interfiere considerablemente en la calidad de las imágenes generadas.	Artículo academico
19	ROMERO	Nuevo Modelo de Inspección de Manifestaciones Patológicas en Pavimentos Flexibles para la Obtención del Índice de Deterioro. Caso Estudio	2022	Brazil-Colombia		Este estudio busca desarrollar una metodología de análisis, evaluación y especialmente de diagnóstico de superficies de rodamiento en vías urbanas que permita representar de forma eficiente los daños y deformaciones de este elemento constructivo. Esta herramienta metodológica propuesta está basada en la teoría de la decisión multicriterio MIVES y su configuración ha sido realizada y planeada a través de análisis de valor de un elemento constructivo para vías interurbanas mediante el proceso de jerarquía analítica (AHP). Para la validación del modelo, han sido evaluadas 5 vías en la ciudad de Foz de Iguazú en el Estado de Paraná (Brasil) y 5 vías en la ciudad de Acacías en el estado del Meta (Colombia) seleccionadas por su alto flujo vehicular y practicidad a la hora de identificar las correspondientes patologías	Trabajo de grado
20	LEON	Identificación de fallas más frecuentes e índice de condición de los pavimentos flexibles, a partir de investigaciones realizadas en el Perú	2021	Peru		Esta investigación tuvo como objetivo identificar las fallas más frecuentes y el índice de condición que presentan los pavimentos flexibles en el Perú, se aplicó un diseño no experimental de corte transversal en donde se analizaron 32 tesis de universidades peruanas referentes a las características de fallas y el índice de condición de los pavimentos flexibles. Para esto, se utilizaron fichas resumen en donde se ubicaron los datos generales de la investigación y también una ficha de recolección de información técnica en donde se colocaron los datos del lugar donde se realizó el estudio y las diferentes fallas que se encontraron, lo cual nos permitió analizarlas.	Trabajo de grado
21	VARGAS	Análisis comparativo de la inspección visual de un pavimento flexible, por los métodos tradicional y por sensores remotos en un kilómetro de la calle séptima en el municipio de Cajicá Cundinamarca	2019	Colombia		Evaluar un tramo de vía para identificar los problemas o patologías con que cuenta ha sido un método tradicional que lleva ya algunos años, lo cual toma tiempo y en algunos casos desgasta a la personal quien evalúa, así como algunos gastos económicos en la obtención de materiales para la toma de muestras e identificación de fallas. Por lo que se busca mediante la comparación de dos metodologías identificar cual es la más viable o factible para la evaluación de una vía de pavimento flexible. Donde el resultado definirá en temas de costo y tiempo la más óptima para la evaluación de esta.	Trabajo de grado

22	MENDOZA	Prototipo en visual basic for application en excel VBA, para el cálculo del índice internacional de rugosidad (IRI) de la capa asfáltica de un pavimento flexible	2017	Colombia	proyecto de grado , describe los procedimientos realizados y requerimientos necesarios para el diseño, elaboración y funcionamiento del prototipo informático que calcula el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), de acuerdo con los estándares solicitados por el Banco Mundial y el Instituto Nacional de Vías de Colombia, INVIAS.	Trabajo de grado
23	PALOMINO	Análisis de las técnicas de evaluación en pavimentos asfálticos: una revisión de la literatura científica	2020	Peru	La presente revisión sistemática recopila los estudios de investigación de distintos buscadores y países, ya sea en idioma inglés o español. Se filtra la información a través de una preselección donde se descarta los documentos por antigüedad y que no guardan relación con la pregunta de investigación. En la selección primaria se utilizarán los criterios de exclusión o seleccionados por el criterio de inclusión. Posteriormente, se describirán las características principales y resultados de cada documento seleccionado. Finalmente, de acuerdo a los hallazgos encontrados se podrá determinar el tipo de evaluación de pavimento que sobresale entre las otras, donde se destacan sus cualidades y limitaciones	Trabajo de grado
24	FLOREZ	Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento.	2022	Colombia	El objetivo de esta investigación es evaluar el uso de sensores remotos (Vehículo Aéreo No Tripulado - VANT - DJI Phantom 4), en la identificación de patologías superficiales de pavimento. Para esto se tomó un tramo vial de prueba de 1 (un) km de longitud, localizado en la vía Siberia – Tenjo en el occidente de la Sabana de Bogotá. Específicamente se pretende determinar la condición de deterioro del pavimento en el tramo vial del estudio, mediante imágenes tomadas con un VANT DJI Phantom 4. Igualmente determinará la condición de deterioro del pavimento en el tramo vial del estudio, mediante el procedimiento convencional de inspección visual in situ. La comparación y análisis de los resultados obtenidos por los dos procedimientos nos dará una visión clara sobre el uso de la tecnología de sensores remotos en este campo de la ingeniería civil. Para cumplir los objetivos planteados, el levantamiento o registro de patologías superficiales del pavimento, se realizó por dos procedimientos, a saber: Uno en equipo de cómputo, sobre imágenes georreferenciadas tomadas con el VANT y para tener una referencia de comparación también se realizó el registro de patologías por medio de inspección visual in situ.	Trabajo de grado
25	SULLO	Optimización del costo y tiempo para el inventario de fallas del pavimento mediante el PCI con dron	2022	Peru	Este presente trabajo de investigación posee el fin determinar el inventario de fallas del pavimento flexible mediante el análisis por imágenes (fotogrametría aérea) haciendo uso de un dron (aeronave pilotada remotamente RPAS) y la evaluación de manera manual, para la evaluación superficial del análisis y evaluación del PCI (Índice de condición de pavimento ASTM D6433), por el cual se determinará la condición real de la vía en la Av. los Próceres, siendo una avenida principal e importante en la localidad de Azángaro - Puno.	Trabajo de grado
26	MARTINEZ ET AL	Vehículos aéreos no tripulados (VANT) en Cuba, aplicados a la geomática: estado actual, perspectivas y desarrollo	2014	Cuba	El desarrollo reciente en el campo de la teledetección desde plataformas aéreas se enfoca en el empleo de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) o UAV (Unmanned Aerial Vehicles) del sector civil, orientados a la captura de datos geoespaciales. En Cuba se dispone de la mencionada tecnología y su aplicación a la Geomática ha sido probada e implementada debido a su alto poder resolutivo para distinguir objetos y fenómenos geográficos que no son posibles apreciar con las tecnologías satelitales actuales. Los datos provenientes de esta tecnología son de gran utilidad para complementar tanto la recolección cotidiana de geoinformación así como, en situaciones de respuesta en emergencias, por la agilidad con la que se colectan y procesan. Los VANT orientados a la Geomática por lo general vienen equipados con cámaras fotográficas digitales no métricas que representan un menor costo en su adquisición, no obstante, otros sensores remotos tales como termovisores, LIDARES y sensores infrarrojos han comenzado a implementarse recientemente en las plataformas VANT, incrementando la información geoespacial captada a través de la mencionada tecnología. Este trabajo presenta una panorámica general de las aplicaciones geomáticas de los VANT desarrolladas en Cuba, las investigaciones y la proyección futura a corto plazo.	Trabajo de grado

27	YAURI, MAMANI	Elaboración de un plan de gestión de pavimentos con el método del Pci mediante el uso del UAV en la Urbanización Ingeniería Larapa Grande San Jerónimo – Cusco 2019	2019	Peru	PCI	El presente trabajo de investigación tiene como objetivo elaborar un Plan de Gestión de Pavimentos, con el método del PCI usando como herramienta principal un vehículo aéreo no tripulado (UAV), que comprende la Urbanización Ingeniería Larapa Grande del Distrito de San Jerónimo. En esta zona de constante desarrollo y crecimiento, se encuentran pavimentos del tipo Rígido, Flexible ó en el caso de la Av. 02 y el Frontis de la UAC que presentan ambos; la superficie del pavimento presenta diferentes tipos de fallas, por lo que se realizó un estudio a detalle, obteniendo fotos de alta resolución del pavimento con el uso del UAV INSPIRE 2, esto para identificar las fallas existentes, por medio de la ortofoto referenciada en el AutoCad CIVIL 3D; y cuantificar el estado de la vía, utilizando el método del PCI que tiene gran aceptación a nivel nacional como internacional. El estudio del deterioro de la superficie del pavimento de la Urbanización Ingeniería Larapa Grande, tiene como finalidad determinar el tipo de intervención, según la condición del pavimento de cada vía de estudio, y con esto el costo estimado para generar un plan de gestión.	Trabajo de grado
28	PUC	Análisis del estado superficial de los pavimentos utilizando sistemas de información geográfica	2019	Mexico	Inspección visual	El proyecto se desarrolla en el contexto de la optimización de la gestión de proyectos de conservación de carreteras en México con la pregunta de investigación: ¿Es posible optimizar la gestión de la conservación de tramos carreteros, a través de incorporar en una plataforma en internet, mapas del estado físico de la red de carreteras y autopistas de Quintana Roo?. La problemática anterior surge ante la falta de disponibilidad de datos abiertos para la gestión de la red de carreteras en cuanto a sus necesidades de conservación, información que están por lo general en archivos electrónicos, dispersos en diferentes sitios u organizaciones, lo cual dificulta su uso integral y automatizado. Con este trabajo fue factible subir a una plataforma, capas de información, aprovechando las ventajas que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (SIG).	Trabajo de grado
29	BALAGUERA	Gestión de Pavimentos Basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG) : Una Revisión	2018	Colombia	Inspección visual	Este trabajo tiene como por objetivo identificar mejoras prácticas para el mantenimiento de la red vial, reconociendo los principales cambios y sugerencias en los sistemas de gestión de pavimentos (sgp) para pavimento flexible, observados en el desarrollo internacional. Metodología: la investigación se basó en un análisis cualitativo-documental, a partir del cual se valoraron los artículos de revistas de alto impacto publicados recientemente, identificando los principales aportes de los sistemas de información geográfica (sig) aplicados a la gestión de pavimentos flexibles. Resultados: los sgp basados en sig posibilitan una administración económica de la red vial, estableciendo una metodología reducida de evaluación sobre pavimentos y facilitando la selección de intervenciones en tramos viales de manera más económica y rápida, considerando la importancia de la recolección, la organización, la verificación, el procesamiento y la adecuada presentación de la información.	Trabajo de grado
30	BELTRAN, RAMIREZ	Creación de un sistema de información geográfico a partir de la recopilación de datos del estado del pavimento en la cabecera municipal de Villavicencio - Meta	2021	Colombia	INVIAS	Mediante la recopilación de datos se crea una base de datos en la aplicación ArcMap junto a la herramienta Excel con el propósito de determinar el estado de la infraestructura vial de Villavicencio estudiada hasta el momento en proyectos de grado de diferentes universidades. El conjunto de proyectos recopilados usa la metodología de inspección visual del INVIAS y cinco de estos realizan el cálculo del índice de condición del pavimento los cuales se encuentran entre regular-malo; dando como resultado una recopilación del 6.35% de las vías de Villavicencio, entre ellas estructuras con pavimento flexible, rígido y vías sin pavimentar.	Artículo academico
31	SILVA, GUALDRON	Gestión de pavimentos flexibles basado en sistema de información geográfica para la red vial de Boyacá, Colombia	2020	Colombia	HERMES	En Colombia, un ejemplo de aplicación de las bases de datos espaciales, es el Sistema Integral Nacional de Carreteras (SINC), alimentado de información entregada por las entidades encargadas de la red vial. Este sistema busca georreferenciar la información de la infraestructura vial como un inventario (Ministerio de Transporte, 2015), se observa su aplicación en el INVÍAS, con el sistema HERMES. Esta información relevante y se recomienda generar una metodología, que con adecuado uso de tecnologías, herramientas computacionales y gestión de pavimentos optimice la condición actual de manera sustentada y con mejoras económicas a futuro. Metodología que puede centrarse como referencia para el desarrollo de la gestión vial a nivel departamental.	Trabajo de grado

32	DURAN ET AL	Implementación del sistema de información geográfica QUATUM GIS para registrar las condiciones de la carretera I003 la en Venezuela	2017	Venezuela	PCI	Las vías vecinales del estado Lara, Venezuela, se han ido deteriorando progresivamente debido a la falta de un plan de mantenimiento programado por parte de las autoridades. En particular, se cree que la situación actual de la vía L003 LA es consecuencia de la ausencia de información sobre las condiciones tanto físicas como de funcionalidad del sistema de drenaje, estado de la señalización vial, mal estado del pavimento y otros problemas sobre parámetros geométricos. Por lo tanto, se creó una base de datos basada en estudios de planos topográficos de su sección transversal, desarrollo de una evaluación PCI de su pavimento y la inspección de su diseño geométrico. Esta base de datos se corrió en un sistema de información geográfica para que fuera posible actualizar periódicamente toda la información. Adicionalmente, se propuso un plan de mejoras para 29.10 km de vía, en el que los resultados de la evaluación del PCI fueron regulares debido a las malas condiciones del sistema de drenaje; y donde la visibilidad y las señales de tráfico eran insatisfactorias.	Artículo academico
33	SUCLUPE	Aplicación de métodos UAV Y VIZIR en la evaluación del estado superficial del pavimento flexible – Avenida Próceres de Huandoy - Los Olivos, 2019	2019	Peru	PCI	Tiene por objetivo aplicar los métodos UAV y VIZIR en la evaluación del estado del pavimento flexible. El trabajo se desarrolló con el fin de analizar el procedimiento de cada método, conocer cómo influyen las fallas en los mismos y ver como clasifican el pavimento flexible. Este trabajo fue posible gracias al apoyo de dos trabajos de investigación que emplearon ambos métodos en la evaluación superficial del pavimento flexible; como fue en un comienzo nuestra idea y que debido al COVID-19 no se pudieron realizar en la zona indicada en un comienzo. La metodología que se empleo tuvo un enfoque mixto, de tipo aplicada, con un nivel correlacional – causal y un diseño no experimental; teniendo como resultado que para la primera tesis, en el método UAV el tramo evaluado se encontraba en estado REGULAR con un PCI de 52 y para el método VIZIR con un valor de 3 también presentaba un estado REGULAR; en el caso de la segunda tesis los resultados discreparon, ya que el método UAV, encontró un pavimento en estado POBRE con un PCI de 29 y el método VIZIR determino el mismo en estado BUENO con un valor promedio de 2.	Trabajo de grado
34	BUSTOS, GIL	Geomática aplicada en la auscultación del pavimento flexible	2018	Colombia	Inspección visual	El modelamiento espacial de la superficie del globo terráqueo se ha convertido en un insumo obligatorio para las necesidades de la población mundial. Así que, los productos basados en lageomántica son un Servicio; Servicio que, en algún momento del proceso cartográfico, se convierte en un Bien para la sociedad. Se busca con este artículo definir y precisar el procedimiento en la aplicación de la geomática, en la auscultación del pavimento flexible para un caso concreto. En ese sentido, se ha seleccionado aplicarla al tramo comprendido entre el peaje El Nuevo Salto(Soacha), hasta El Colegio en la región del Tequendama de Cundinamarca (33 kilómetros), con el fin de determinar analíticamente el estado y deterioro del mismo, interpretando la información que resulta del empleo de los datos que arrojan los georadares detallando los elementos y variables que conforman una base de datos que georreferencien las herramientas para desarrollar una descripción del estado actual de ese pavimentado	Trabajo de grado
35	PACHON,GONZALEZ	Implementación de un sistema de información geográfica para el control y evaluación del mantenimiento y rehabilitación vial de la doble calzada Bogotá - Girardot	2016	Colombia		Este proyecto pretende brindar una herramienta que permita el control y evaluación de la etapa de mantenimiento y rehabilitación de la doble calzada Bogotá Girardot, generando un mejor entorno visual para realizar análisis complejos, con el fin de tomar decisiones más eficientes, optimizar recursos, administración adecuada y posibilitar un conocimiento más completo de la información desde cualquier parte sin necesidad de trasladarse a la obra.	Trabajo de grado

36	GALLARDO ET AL	Caracterización de la tipología de fallos presentados en los pavimentos de la ciudad de Ocaña Norte de Santander	2017	Colombia		Los fallos en los pavimentos se presentan por el deterioro progresivo que les ocurre con el tiempo. Una forma de identificar los fallos es mediante una inspección visual, es así como en esta investigación se inspeccionaron varios tramos de las principales vías urbanas del municipio de Ocaña, Norte de Santander. La información se consolidó mediante formatos en donde se registraron coordenadas, anchos del carril, nivel de severidad, observaciones y registro fotográfico de los fallos. Una vez tabulada la información se encontró que fueron analizados 9.277 ml de tramos viales, de los cuales 3.051 ml (32.89%) tienen pavimento flexible y 6.226 ml (67.11%) pavimento rígido. En los flexibles las tipologías de fallos más representativas fueron piel de cocodrilo y baches y, para el caso de los rígidos fueron las grietas y desintegración. El grado de severidad de los fallos mencionados, tanto para el caso de los pavimentos flexibles como rígidos es de medio a alto; siendo esto un indicador de los niveles de deterioro que poseen los pavimentos en los sectores viales analizados.	Trabajo de grado
37	VILLEGAS	Evaluación superficial mediante el método VIZIR para mejorar el pavimento flexible de la carretera Celendín-Balsas, Cajamarca-2020	2020	Peru	PCI y Vizir	El presente proyecto de investigación presenta los principales aspectos relacionados a la evaluación superficial del pavimento con el método VIZIR y PCI, que nos permiten plantear como alternativas para la evaluación del pavimento, el cual facilita proporcionar una base de datos para proyectar el comportamiento futuro, para finalmente establecer la necesidad y tipo de rehabilitación que puedan requerir los pavimentos.	Trabajo de grado
38	Alzate	Sistema de clasificación de severidad de daños en pavimentos flexibles para determinar posibles intervenciones	2019	Colombia	PCI y Vizir	El presente trabajo pretende proponer una metodología de evaluación y determinación de posibles intervenciones para el pavimento flexible de un segmento de vía, buscando dar prioridad siempre a conservar un buen estado del pavimento y disminuir costos de mantenimiento. Con el fin de establecer una línea base para la metodología se toma como referencia las metodologías de inspección visual y evaluación de pavimentos existentes, estas metodologías se utilizaron para el levantamiento inicial de los datos en una vía del municipio de Rionegro, Antioquia. Las metodologías son, PCY y VIZIR, realizando un análisis de los resultados obtenidos con cada una de ellas, se propone una metodología de evaluación de pavimentos flexibles y con esta metodología se establecen unos rangos con el fin de determinar de manera matemática las posibles intervenciones.	Artículo academico
39	CORDERO, PONCE	Determinación de fallas en el pavimento flexible de la AV. John F. Kennedy ubicada en la ciudad de Jipijapa	2019	Ecuador		El documento presenta una descripción de todas las fallas con su respectiva información de vital importancia de todos los daños localizados en la estructura de pavimento flexible, deterioros causados por un sinnúmero de indicadores que permiten que la severidad de los mismos aumente considerablemente, dichos daños son establecidos por la normativa vigente que rige para realizar este tipo de proyectos viales como la American Society for Testing Materials que a partir de ahora será ASTM D6433-07, que permite elaborar un estudio más completo y sofisticado a la carpeta asfáltica del pavimento en cuestión y todas las carreteras a nivel del mundo. El objetivo central de la presente investigación fue conocer a fondo la condición actual de la calzada del pavimento flexible de la Av. John F. Kennedy, evaluando daño por daño en la vía en mención y seguir estrictamente con lo indicado en el manual de daños del índice de la Condición de Pavimento a partir de ahora será PCI. En la ciudad de Jipijapa las vías tienen daños con altos niveles de gravedad por varios indicadores como falta de mantenimiento preventivo/correctivo y a la carencia de estudios geotécnicos en la zona	Trabajo de grado

40	CARDENAS ET AL	Auscultación visual realizada mediante el Drone Dji Phantom 4 pro, con implementación de metodologías Vizir y Pci para pavimentos flexibles en la Carrera 69b Sur entre la Avenida Primera de Mayo y Calle 9 a Sur - Barrio Villa Claudia - Ciudad Bogotá	2019	Colombia	PCI y Vizir	En este trabajo se encuentra la evaluación de la condición del pavimento, realizada en la carrera 69b sur entre la avenida primera de mayo y calle 9a sur, barrio villa claudia en la ciudad de Bogotá, en un tramo de 0.912 Km; la cual debe estar en óptimas condiciones para el proyecto a ejecutar por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), teniendo en cuenta su gran relevancia dentro de la malla vial del sector por su gran flujo vehicular y su conexión a la malla arterial principal; Además se da a conocer información, procedimientos y evaluación, sobre cada uno de los parámetros de las metodologías de auscultación visual del pavimento; las cuales han sido usadas a nivel mundial, por la facilidad de evaluar el deterioro del pavimento, así establecer el estado y clasificación del pavimento flexible; asimismo estas metodologías son usadas en el país, la metodología PCI (Norteamericana) usada por Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y la metodología VIZIR (Francesa) usada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).	Trabajo de grado
41	OSPINO, TINOCO	Análisis de daño por causa del envejecimiento y auscultación en estructuras de pavimentos flexibles en las ciudades de Santa Marta y Barranquilla entre los años 2012-2017	2019	Colombia		La temperatura, el efecto de los rayos ultravioleta, la humedad, la oxidación, los malos procesos constructivos que se llevan a cabo in situ y las propiedades físico-químicas en las mezclas asfálticas. La investigación dará como resultado las pautas para el diagnóstico del pavimento flexible y una estrategia de rehabilitación. El presente análisis, está enfocado en el daño por causa del envejecimiento en las ciudades de Santa Marta y Barranquilla. Con la intención de que en Santa Marta se realizará la auscultación de la calle 39 desde la carrera 34 hasta la carrera 42 (Cerca del parqueadero del C.C. Buenavista sector de Mamatoco), donde se hará seguimiento a las patologías encontradas y se propondrá una solución llamada "inyecciones neumáticas de mezclas asfálticas" que se ha implementado para el mantenimiento de este tipo de pavimentos en la ciudad de Bogotá D.C.	Trabajo de grado
42	CHENGJIA	Construction quality evaluation of asphalt pavement based on BIM and GIS	2022	China		La evaluación de la calidad de la construcción es fundamental para garantizar el desempeño a largo plazo del pavimento asfáltico. Los enfoques de evaluación existentes retrasan y limitan la eficiencia del control de calidad. Para resolver este problema, este estudio propuso un nuevo marco de evaluación de la calidad de la construcción, que era una combinación del modelo de información de construcción (BIM) y el sistema de información geográfica (GIS). El marco realizó la evaluación de calidad en tiempo real y de proceso completo en la construcción de pavimento de asfalto	Artículo académico
43	ALDELGAWY ET AL	Integrating gps and gis technologies to enhance pavement management system process: A case study	2022	Egipto		El estudio del estado del pavimento es la columna vertebral de la implementación exitosa del sistema de gestión de pavimentos (PMS), que es una de las aplicaciones altamente demandadas del sistema de posicionamiento global (GPS) y el sistema de información geográfica (GIS). El objetivo de esta investigación es resaltar la importancia de integrar las tecnologías GPS y GIS para mejorar el proceso de toma de decisiones de mantenimiento del sistema de gestión de pavimentos (PMS). Para lograr este objetivo, se recolectaron y analizaron datos de la condición del pavimento para la carretera de circunvalación (20 km de longitud) de la ciudad de Fayoum, Egipto, que se dividió en 25 secciones homogéneas. Los datos recopilados se basan en datos espaciales recopilados por GPS, datos visuales tomados por una cámara digital y datos manipulados mediante GIS. Se utilizó un receptor GPS portátil para el catastro vial y una cámara digital para la recopilación de información semántica. Las coordenadas GPS se proyectaron en la proyección Red Belt (la proyección local).	Artículo académico

44	DANIYATI ET AL	The Implementation of Road Evaluation and Monitoring System at The City Road Conditions	2020	Indonesia	El rápido desarrollo de la nueva infraestructura vial de la ciudad hace que la ignorancia de los indonesios piense en mantener la infraestructura vial que se ha construido. Así lo indica el débil esfuerzo en el mantenimiento de la infraestructura vial por parte de la agencia, por ejemplo: la ausencia de un buen registro histórico de un tramo vial desde que se empezó a construir hasta que se mantiene, no hay continuidad e integración en el registro de la historia de los tramos de carretera. Se necesita una acción para resolver los problemas mediante la formación de un sistema de gestión de mantenimiento de carreteras. Esta investigación involucra dos tipos de datos primarios que consisten en datos del marco del sistema y datos de estudios de casos. El primero sirve como determinante de la dirección de la lógica de programación informática que puede funcionar como modelo para el proceso de almacenamiento, procesamiento y presentación de datos de estudios de casos. mientras que los datos del estudio de caso son datos de campo fácticos obtenidos mediante la realización de una encuesta directa en cuatro calles de la ciudad, a saber, Joko Tingkir street, Monginsidi street, Ir. Calle Juanda y Kyai Mojo. Todas las imágenes de daños, el tipo y las coordenadas de los segmentos del campo se registran utilizando la aplicación del Sistema de Monitoreo y Mantenimiento de Carreteras (REMS). El valor del índice de condición del pavimento (PCI) de cada sección de la carretera se muestra y genera la aplicación Android REMS y luego se procesa para determinar la gran estrategia de mantenimiento y rehabilitación.	Artículo academico
45	GADHA GILAND	Modelo de sistema para condiciones físicas de componentes viales en el distrito de Magetan	2018	Indonesia	En este estudio, se desarrollaron modelos de componentes de pavimento y evaluaciones de componentes externos para evaluar el desempeño vial y la prioridad del manejo del mantenimiento vial nacional en el distrito de Magetan, que se espera sea un aporte para los responsables de la formulación de políticas en la implementación de carreteras nacionales en el distrito de Magetan. La ponderación de los daños en los componentes de la vía se determina en función de su importancia debido a que hasta el momento no se ha realizado una ponderación para cada uno de los componentes de la vía. Las comparaciones por pares se utilizan a menudo para determinar la importancia relativa de los elementos y criterios existentes. Para cada criterio de comparación por pares, una alternativa (comparación por pares) es comparar cada elemento en cada nivel de la jerarquía en pares para que se pueda encontrar la importancia del elemento en forma de opinión cualitativa. Para las opiniones cualitativas cuantitativas se utiliza la escala de valoración por lo que el valor de las opiniones se obtendrá en forma de números (cualitativo). Por lo general, el problema de escala del 1 al 9 se considera la mejor escala en opinión cualitativa, con una precisión basada en RMS (desviación cuadrática media) y MAD (desviación media absoluta).	Artículo academico
46	INVIAS	Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras	2006	Colombia	El manual contiene una serie de herramientas prácticas que pueden ser empleadas por los ingenieros, fin de obtener un informe de los daños encontrados durante la inspección visual, permita identificar el tipo, la magnitud severidad de los mismos, como su localización y los sectores de vía más afectados, de acuerdo la intervención realizada por cada contrato. El manual consta de cuatro capítulos: En el capítulo 1 se presenta una descripción de los daños más comunes encontrados en pavimentos flexibles, mostrando una breve definición de los mismos, causas que los generan, unidad de medición, así sus severidades y evolución probable, cuando estas últimas están definidas. También se incluyó para cada año una fotografía y un esquema con el fin de ilustrar y orientar la definición de los daños en campo.	Trabajo de grado
47	ZAKERI ET AL	Técnicas basadas en imágenes para la detección, clasificación y cuantificación de grietas en pavimentos asfálticos: una revisión	2017	España	La parte principal de este estudio presenta una combinación integral del estado del arte en procesamiento de imágenes basado en la interpretación de grietas relacionadas con pavimentos asfálticos. Se hace un intento de estudiar las metodologías existentes desde diferentes puntos de vista, acompañado de extensas comparaciones en tres etapas de los métodos: detección de problemas, clasificación y cuantificación para facilitar más estudios de investigación. Este artículo presenta un estudio de los sistemas de inspección de pavimentos desarrollados hasta la fecha. Además, se discuten las tecnologías emergentes y en evolución consideradas para automatizar los procesos.	Artículo academico

48	LOPRENCIPE	Un Procedimiento Específico para la Identificación y Evaluación de Superficies de Carreteras Urbanas Basado en PCI	2017	Italia	PCI	En este artículo, se presenta un procedimiento simplificado para la evaluación de la integridad estructural del pavimento y el nivel de servicio de las superficies de carreteras urbanas. Se consideró una muestra de 109 pavimentos urbanos de hormigón asfáltico (AC) de una red vial italiana para validar la metodología. Como parte de esta investigación, se han determinado mediante análisis estadístico los defectos más recurrentes, los nunca encontrados y los no definidos con respecto a la lista recogida en la norma ASTM D6433. El objetivo de esta investigación es la mejora del Catálogo de identificación de peligros de la norma ASTM D6433 para adaptarlo a las superficies de carreteras urbanas. La metodología presentada incluye la implementación de un programa basado en lenguaje Visual Basic for Application (VBA) para la computarización del cálculo del Índice de Condición del Pavimento (PCI) con interpolación por el spline cúbico paramétrico de todas las curvas de densidad/valor de deducción de la norma ASTM D6433. tipos Además, se propusieron dos nuevas definiciones de deterioro (para bocas de acceso y para raíces de árboles) y nuevos valores de curva de densidad/deducción para lograr un nuevo manual de identificación de deterioro para pavimentos de carreteras urbanas.	Artículo academico
49	LOPRENCIPE	Sistema de Gestión Sostenible de Pavimentos en Áreas Urbanas Considerando los Costos de Operación Vehicular	2017	Italia		Este artículo trata sobre un Sistema de Gestión de Pavimentos (PMS) de fácil implementación para desarrollar estrategias de mantenimiento, conservación y rehabilitación de vías urbanas. El método propuesto incluye la creación del inventario de la red vial, los levantamientos visuales del pavimento y la evaluación de su estado por el Índice de Condición del Pavimento (PCI). El método pretende dar una herramienta válida a los administradores de carreteras para comparar estrategias alternativas de mantenimiento y realizar el análisis de prioridad en la red. Con este objetivo, el procedimiento evalúa los Costos de Operación del Vehículo (VOC) mediante una regresión escrita entre el PCI y el Índice Internacional de Rugosidad (IRI). El método propuesto tiene varias ventajas porque se puede adaptar fácilmente a diversas situaciones y no requiere una gran cantidad de tiempo y dinero para su implementación.	Artículo academico
50	MACEA ET AL	Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo	2015	Colombia		El presente artículo propone y discute la implementación de un sistema para países en vía de desarrollo, que está basado en nuevas tecnologías que facilitan la toma y análisis de información para los procesos de gestión de pavimentos, con tiempos y costos razonables. El sistema propuesto utiliza un vehículo equipado con elementos que permiten el registro y localización geográfica automática de daños existentes en los pavimentos, así como la generación de mapas de deterioro vial a través de plataformas WEB, que se pueden utilizar para justificar la toma de decisiones en torno a políticas de inversión en infraestructura vial.	Artículo academico
51	ESCOBAR ET AL	Análisis comparativo de la evaluación de pavimentos por medio de la viga Benkelman y el deflectómetro de impacto Falling Weight Deflectómetro, FWD	2007	El Salvador	Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (FWD)	En El Salvador la evaluación estructural de pavimentos realizada mediante ensayos no destructivos "NDT" (en inglés: non destructive test), ha sido a través de diferentes equipos de deflectometría, entre los cuales se tiene la viga Benkelman el cual pertenece a la rama de los equipos de deflexión estática. El objetivo de este trabajo es determinar una correlación entre los datos obtenidos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (FWD), a partir de la medición de deflexiones. Lo que se busca con este estudio es comprender, interpretar y comparar con mejor juicio los resultados obtenidos con ambos equipos y su uso para la evaluación estructural de pavimentos y preparar a los constructores, supervisores, diseñadores e investigadores.	Trabajo de grado
52	PEREIRA ET AL	Escala visual para evaluación de pavimentos urbanos: Una validación en oficina	2018	Brazil	Inspección visual	El objetivo de esta investigación es validar en oficina una escala visual compuesta por fotografías representativas de cada intervalo de clasificación adoptado para verificación de la condición de los pavimentos. Informaciones básicas acerca del proceso de evaluación han sido mostradas a los dos paneles. Se presentó la escala visual usada como referencia en este estudio solamente a uno de los paneles. Ambos paneles evaluaron fotografías de variadas condiciones de la superficie de vías urbanas, clasificándolas por medio de asignación de notas entre 0 (cero) y 10 (diez).	Trabajo de grado

53	PINATT ET AL	Perspectivas interdisciplinarias de la investigación del transporte	2019	Brazil	PCI	El objetivo de esta investigación fue analizar las evaluaciones objetivas y subjetivas del Índice de Condición del Pavimento (PCI) utilizado en el Sistema de Gestión de Pavimentos Urbanos (UPMS) utilizando SIG e identificar las vías más dañadas. Esta investigación se llevó a cabo en el estado de Paraná (PR), Brasil. Se realizó una evaluación funcional, con identificación del defecto mediante análisis visual por el método PCI. Se realizaron dos tipos de evaluación, objetiva y subjetiva, las cuales se compararon entre sí utilizando el coeficiente de Pearson correlación. Posteriormente se generaron mapas en el software ArcGIS 10.2. Se observó que el 92,21% de las secciones fueron clasificadas como “muy buenas” a “regulares”, mientras que el 7,94% fueron clasificadas como “malas” o “muy malas”. Fue posible comprobar la similitud entre los resultados de las evaluaciones objetivas y subjetivas a partir de la correlación de Pearson.	Artículo académico
54	RAGNOLI	Métodos de detección de daños en el pavimento: una revisión	2018	Italia	Estado del arte	Este artículo presenta una revisión de la literatura sobre los sistemas de recolección de datos y el enfoque de procesamiento para la evaluación del estado del pavimento. Se han incluido tanto soluciones comerciales como enfoques de investigación. El objetivo principal es dibujar un marco de las soluciones existentes reales, considerándolas desde un punto de vista diferente para identificar las más adecuadas para futuras investigaciones y mejoras técnicas, al mismo tiempo que se consideran las tecnologías emergentes automatizadas y semiautomatizadas. Un intento importante es evaluar la adecuación de la recopilación y extracción de datos al tipo de daño, considerando las fases de detección, clasificación y cuantificación de la daño del procedimiento. considerando también las tecnologías emergentes automatizadas y semiautomatizadas. Un intento importante es evaluar la adecuación de la recopilación y extracción de datos al tipo de daño, considerando las fases de detección, clasificación y cuantificación del daño del procedimiento. considerando también las tecnologías emergentes automatizadas y semiautomatizadas.	Artículo académico
55	REAL	Evaluación estructural de pavimentos flexibles considerando la circulación de vehículos de carga tipo bitrén	2021	Colombia	metodología SHELL y el método del instituto del asfalto	Con el objeto de establecer los potenciales daños que puede generar este tipo de vehículos, se realizó una evaluación del daño por fatiga y ahuecamiento en la estructura del pavimento con la variación del clima y subrasante, para lo cual se utilizó la metodología SHELL y el método del instituto del asfalto. Como resultado se encontró que, con la implementación de estos vehículos, se reduce el número de ejes equivalentes beneficiando las condiciones de daño para la estructura del pavimento.	Trabajo de grado
56	RUIZ, MARTINEZ	Aplicación de metodología de evaluación PCI a pavimento flexible en la localidad de Engativá	2019	Colombia	PCI	El propósito de este trabajo consiste en aplicar una de las metodologías de auscultación más común, PCI, realizando la valoración del pavimento por la misma, partiendo de la visita a campo para la recolección de información en donde se inspeccionará cada deterioro encontrado de acuerdo a su grado de afectación y características propias existentes; y siguiendo el procedimiento descrito en el método se estimará el estado superficial del pavimento.	Artículo académico
57	SHAH	Desarrollo del Índice de Condición General del Pavimento para la Red Vial Urbana	2013	India	OPCI	El presente documento busca desarrollar un Índice de Condición General del Pavimento (OPCI) combinado para la red seleccionada de vías urbanas de Noida. El área de estudio consta de 10 tramos de carreteras urbanas que constituyen 29,92 km de la ciudad de Noida. La metodología incluye la identificación de tramos de vías urbanas, la recopilación de datos de deterioro del pavimento, el desarrollo de índices de deterioro individuales y, finalmente, el desarrollo de un OPCI combinado para la red.	Artículo académico

58	MONTEJO	Ingeniería de pavimentos para carreteras	2002	Colombia		Distribuido en 16 capítulos: conceptos teóricos básicos para el entendimiento de los criterios de diseño de estructuras nuevas y de mejoramiento de las existentes; Metodología para la evaluación del tránsito vehicular existente y esperado para el periodo previsto de diseño; Establecimiento de un sistema de estudio de suelos; Métodos de estabilización de suelos con los aditivos; Últimos métodos de diseño de pavimentos: flexibles, rígidos y articulados; Características geotécnicas de los materiales usados en la construcción y mantenimiento de los diversos tipos de pavimento; Estudio de la compactación de suelos y mezclas bituminosas; Establecimiento de una metodología para la evaluación de los pavimentos en servicio, métodos de diseño de obras de mejoramiento; Reciclado de pavimentos flexibles; Características de los asfaltos modificados y sus principales componentes; Técnica de aplicación del asfalto mediante un procedimiento de espumado; Mezclas asfálticas drenantes, mejoras en la seguridad de los usuarios; El programa SHRP de los Estados Unidos sobre ligantes bituminosos y las mezclas asfálticas; Estudio del control estadístico de calidad y planteamiento de un modelo. Ejemplos y gráficas. Comprende la planificación, construcción, administración, operación y rehabilitación de los pavimentos.	Libro
59	TELLO ET AL	Evaluación de daños en pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales	2021	Colombia	Inspección visual	Este documento presenta una metodología para la evaluación de los deterioros presentes en pavimento flexible usando técnicas de fotogrametría terrestre y redes neuronales que está compuesta por seis etapas: i. Captura de las imágenes, ii. Preprocesamiento de las imágenes, iii. Segmentación mediante técnicas de detección de bordes, iv. Extracción de las características, v. Clasificación utilizando redes neuronales, y vi. Evaluación del área de afectación del deterioro. La metodología se evaluó con imágenes reales de pavimento con tres tipos de deterioro: grieta longitudinal, piel de cocodrilo y bache. Como clasificador se utilizó una red neuronal multicapa con configuración (12 12 3), entrenada utilizando el algoritmo Levenberg Marquardt de retropropagación.	Artículo académico
60	WU ET AL	Red guiada por muestras y estructuras para la detección de grietas en carreteras	2019	China	Inspección visual	Este artículo presenta una red guiada por muestra y estructura para la detección de grietas en carreteras. Específicamente, la red propuesta se basa en la arquitectura U-Net, que mantiene los detalles desde la entrada hasta la salida mediante el uso de la estrategia de conexión de salto. Entonces, debido a que la escala de las muestras de grietas es mucho más pequeña que la de las que no son grietas, el uso directo de la pérdida de entropía cruzada convencional no puede optimizar la red de manera efectiva. En este caso, la pérdida focal se utiliza para abordar el problema de optimización del modelo. Además, incorporamos la estrategia de autoatención en la red propuesta, que mejora su estabilidad al codificar la información de 2 órdenes entre diferentes regiones locales en las características finales. Finalmente, probamos el método propuesto en cuatro conjuntos de datos, tres públicos con etiquetas y uno fotografiado sin etiquetas, para validar su efectividad.	Artículo académico
61	AGUIRRE ET AL	Gestión de la calidad de vías terrestres, una perspectiva comparada entre México y Colombia.	2015	Colombia		Evaluar la calidad de las vías, ya sea en sus materiales, su conformación, o en su geometría misma, es de vital importancia a la hora de poner en funcionamiento un producto que generara grandes niveles de demanda. Este comparativo de la gestión de calidad de las vías en Colombia y México, identifican los procesos evaluativos de las dos naciones, así como las entidades encargadas de esta gestión.	Artículo académico
62	AL NEAMI	Evaluación de la calle Al-Amarah dentro de la ciudad de Al-kut utilizando el índice de condición del pavimento (PCI) y la técnica GIS	2018	Irak	PCI y PAVER	Esta investigación se ha llevado a cabo para estimar la condición de un pavimento flexible a través de levantamientos visuales utilizando el método del Índice de Condición del Pavimento (PCI); por lo que puede proporcionar una manera fácil de calcular el PCI en función de los datos GIS con el software Micro PAVER 5.2. Calle Al-Amarah, que es una carretera interna en la ciudad de Al-Kut en la parte oriental de Irak, se utiliza como estudio de caso. El índice de condición del pavimento promedio del estudio de caso seleccionado se encuentra en "64" utilizando el software Micro PAVER 5.2, lo que significa una condición del pavimento "Regular". Arc Map 9.3 se ha aplicado en este estudio para hacer un sistema de mantenimiento integrado para cada camino en la región que demuestra el deterioro anual de los caminos y el cambio resultante en los valores de PCI que ocurre cada año.	Artículo académico

63	BENAVIDES ET AL	Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles	2020	Peru	Estado del arte	el objetivo de este artículo fue detallar la evolución de las diferentes tecnologías que permiten evaluar los pavimentos. Metodológicamente, el estudio se basó en un análisis cualitativo-documental, a partir del cual se valoraron los artículos de revistas de alto impacto publicados recientemente, identificando los principales aportes de la tecnología para la evaluación de pavimentos flexibles. La tecnología de pavimentos ha ido evolucionando desde simples parámetros de inspección visual, a bases de datos maestras, en software y hardware de evaluación del pavimento, que predicen y evalúan estadísticamente, la aparición de las patologías y su respectiva toma de decisiones, procedimientos correctivos y preventivos de mantenimiento.	Artículo academico
64	BENNET	Tecnologías de recopilación de datos para la gestión de carreteras	2006	USA	Estado del arte	El propósito de este informe es brindar una descripción general de las tecnologías actualmente disponibles y proporcionar información que podría ayudar a los gerentes a establecer un programa adecuado de recopilación de datos y adquirir el equipo apropiado para recopilar los datos. El proyecto incluye una revisión de la literatura y una encuesta exhaustiva de proveedores y usuarios, las cuales se realizaron a fines de 2004.	Artículo academico
65	CASTRO ET AL	Tecnologías empleadas en la evaluación de pavimentos e impacto que han generado	2021	Peru	IRI, PCI y SDI	El estudio de los diferentes métodos de evaluación tradicionales como el IRI, PCI, SDI, entre otros, con la incorporación de las nuevas tecnologías nos permite definir los métodos más idóneos y de bajo costo para la evaluación de las vías, teniendo como objetivo conocer los diferentes métodos de evaluación de pavimentos que permitan conocer las típicas fallas de estos y tiempo de vida útil, dando un debido mantenimiento en el tiempo que estas lo requieran; por lo que es importante definir cuáles son los métodos y tecnologías aplicados a estos que podremos utilizar para una determinada zona o región, ya que cada lugar es diferente y se requieren utilizar métodos sencillos, seguros y económicos, que permitan determinar la alternativa de mantenimiento o rehabilitación adecuada, dando resultados óptimos y previniendo la afectación de las carreteras.	Artículo academico
66	COENEN	Una revisión de los métodos automatizados de detección de daños en el pavimento	2017	Reino Unido	Estado del arte	En este artículo, se presenta una revisión de la literatura sobre las angustias y los métodos de detección relacionados. Esta revisión también incluye soluciones comerciales. A partir de entonces, se lleva a cabo un análisis de brechas que concluye que, en particular, las fallas relacionadas con la microtextura del pavimento necesitan una investigación adicional seria para implementarse de manera rentable. Las fallas relacionadas con la profundidad se detectan bastante bien, pero dependen de herramientas costosas.	Artículo academico