

**COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE LEVANTAMIENTO DE
PATOLOGÍAS EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES**



LUIS CARLOS MÁSMELA GARCÍA



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO**

2024

**COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE LEVANTAMIENTO DE
PATOLOGÍAS EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES**

LUIS CARLOS MÁSMELA GARCÍA

Trabajo de grado para optar por el Título de Ingeniero Civil

Asesor:

I.C. JESSICA RAMÍREZ CUELLO, M.Sc.

Magister en Ingeniería civil

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO**

2024

Autoridades Académicas

Fray, Álvaro José Arango Restrepo, O.P.

Rector General

Fray Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

Padre José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo GARCÍA JARA, O. P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Dra. Julieth Andrea Sierra Tobón

Secretaria de División Sede Villavicencio

I.C. Luis Fernando Díaz Cruz, Mg.

Decano de la Facultad de ingeniería civil

Dedicatoria

A Dios por bendecirme con su guía a lo largo de este camino académico, y estar presente en cada uno de mis logros. A mi familia, quienes son mi fuente inagotable de apoyo incondicional, mi compañía y consejeros de vida. A Laura, Karla, Cesar y Eneida por acompañarme durante este proceso y ser parte de mi vida e influir en mi desarrollo profesional.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a la ingeniera Jessica Ramirez Cuello, por su paciencia y entrega en este proceso, realmente fue un aporte super importante y una guía contaste a lo largo de mi paso por la universidad.

Adicionalmente gracias al resto del cuerpo docente de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio por sus valiosas contribuciones a mi futuro.

Tabla de Contenido

1.	Resumen.....	9
2.	Abstract.	10
3.	Introducción	11
4.	Objetivos	12
4.1.	Objetivo General.....	12
4.2.	Objetivos Específicos.....	12
5.	Descripción del Tema	13
6.	Tipos de daños en pavimentos flexibles.	15
6.1.	Fisuras	15
6.2.	Deformaciones	21
6.3.	Perdidas de la capa de la estructura.	23
7.	Metodologías de Evaluación en Pavimentos	25
7.1.	Método VIZIR	26
7.2.	Método de auscultación pavement Condition Index (PCI).....	29
7.3.	Red de funciones neuronales de base radial (RBFNN)	30
7.3.1.	Metodología.	30
8.	Comparación de las metodologías VIZIR y Redes neuronales de base radial.	33
9 .	Comparación de las metodologías PCI y Redes neuronales de base radial.	34
	Conclusiones	35
	Bibliografía	36

Lista de tablas.

Tabla 1. Categoría y clasificación de daños Metodología VIZIR. (INVIAS 2006)	27
Tabla 2. Aproximación del grado de deterioro	28
Tabla 3. Estado de la superficie de pavimento por medio del Índice de Deterioro	28
Tabla 4. Rango de Clasificación de metodología PCI	29
Tabla 5. Comparación métodos VIZIR y Red de funciones neuronales de base radial.....	33

Lista de Figuras

Figura 1	Fisuras longitudinales y Fisuras transversales.....	16
Figura 2	Piel de cocodrilo	17
Figura 3	Fisuras en junta de construcción	18
Figura 4	Fisuras por reflexión de juntas	18
Figura 5	Fisuras en medialuna.	19
Figura 6	Fisuras en borde.....	20
Figura 7	Fisuras en bloque.....	20
Figura 8	Ahuellamiento	21
Figura 9	Ondulación	22
Figura 10	Abultamiento y hundimiento.....	22
Figura 11	Descascaramiento.....	23
Figura 12	Bache	24
Figura 13	Capturador de imágenes internacional cibernetics	26

1. Resumen

El mantenimiento de una estructura de pavimento es esencial para garantizar su durabilidad y rendimiento a lo largo del tiempo, ya que su vida útil varía entre 8 y 20 años. La identificación y evaluación de posibles deterioros son cruciales para alcanzar la proyección de su máxima duración. La recopilación de datos juega un papel vital en la búsqueda de soluciones y en la intervención adecuada en el pavimento. Existen diversas metodologías para el levantamiento de patologías, considerando factores como el alcance de la evaluación, costos y recursos disponibles. Por ello se realizará un análisis comparativo entre los diferentes métodos de levantamiento para patologías de las carreteras adoptados por el INVIAS, y métodos alternos que involucran tecnologías innovadoras como redes neuronales. En Colombia, el MTC, ministerio de transporte y comunicaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2006) es ampliamente utilizado para evaluar patologías en pavimentos, así mismo las metodologías VIZIR y PCI, las cuales presentan limitaciones al depender principalmente de inspecciones visuales. En respuesta a esto, se han desarrollado tecnologías más avanzadas, como las redes neuronales, que mejoran significativamente la detección de patologías en carreteras y superficies pavimentadas.

Palabra clave: Inteligencia artificial, levantamiento de daños, metodologías, patologías, pavimento flexible.

2. Abstract.

The maintenance of a pavement structure is essential to guarantee its durability and performance over time since its useful life varies between 8 and 20 years. The identification and evaluation of possible deteriorations are crucial to achieve the projection of its maximum duration. Data collection plays a vital role in finding solutions and providing appropriate pavement intervention. There are various methodologies for surveying pathologies, considering factors such as the scope of the evaluation, costs, and available resources. For this reason, a comparative analysis will be carried out between the different survey methods for road pathologies adopted by INVIAS, and alternative methods that involve innovative technologies such as neural networks. In Colombia, the MTC, Ministry of Transportation and Communications of the National Highway Institute (INVIAS, 2006) is widely used to evaluate pathologies in pavements, as well as the VIZIR and PCI methodologies, which have limitations by depending mainly on visual inspections. In response to this, more advanced technologies have been developed, such as neural networks, which significantly improve the detection of pathologies on roads and paved surfaces.

Keyword: Methodology, survey, pathologies, and artificial intelligence.

3. Introducción

Los pavimentos son una de las principales infraestructuras en el transporte vial, mantener una carretera en las mismas condiciones a lo largo de su vida resulta complicado, es por ello que se debe llevar a cabo un seguimiento del estado de las vías. En Colombia se utiliza mayormente métodos de inspección visual, por su facilidad a la hora de evaluar el estado de un pavimento, el MTC del Instituto Nacional de Vías es ampliamente utilizado para evaluar patologías en pavimentos.

La clasificación precisa de patologías en pavimentos es esencial para definir el tipo de intervención y garantizar su durabilidad y rendimiento a lo largo del tiempo. Diversas metodologías se han desarrollado para abordar este desafío, destacando entre ellas el método VIZIR, el Pavement Condition Index (PCI) y las Redes Neuronales. Cada enfoque ofrece perspectivas únicas y herramientas especializadas para la identificación y clasificación de deterioros en las superficies pavimentadas. El método VIZIR, basado en evaluación visual, proporciona una aproximación ágil y sencilla, clasificando los daños en tipos estructurales y funcionales. En contraste, el PCI, al considerar múltiples patologías y asignar calificaciones detalladas, se presenta como un sistema completo y objetivo. Por último, las Redes Neuronales, a través de algoritmos de aprendizaje automático, ofrecen la capacidad de procesar datos complejos y predecir patologías futuras. Esta introducción explorará las características distintivas de cada metodología, resaltando sus aplicaciones y contribuciones al campo de la evaluación de pavimentos.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General.

Realizar un análisis comparativo entre los diferentes métodos de levantamiento para patologías de las carreteras adoptados por el INVIAS, y métodos alternos que involucran tecnologías innovadoras como redes neuronales.

4.2. Objetivos Específicos.

- Determinar las limitaciones del método establecido por el INVIAS, en comparación con técnicas de evaluación de daños en los pavimentos.
- Identificar las ventajas que tiene la aplicación de redes neuronales, frente a las técnicas de inspección visual para detectar daños futuros.

5. Descripción del Tema

En Colombia, el desarrollo de tecnologías para pavimentos ha experimentado avances significativos con el objetivo principal de prevenir deterioros y fallos en las infraestructuras viales. El estado de las carreteras y calles es crucial para garantizar la seguridad vial, la eficiencia del transporte y el desarrollo económico del país. Diversas innovaciones tecnológicas se han implementado para abordar los desafíos asociados con el clima, el tráfico intenso y otros factores que contribuyen al desgaste de las superficies de pavimento.

Una de las tecnologías clave en este ámbito es la aplicación de mezclas asfálticas modificadas, diseñadas para mejorar la resistencia y durabilidad de los pavimentos. Estas mezclas suelen incorporar aditivos como polímeros y fibras que refuerzan la estructura del asfalto, reduciendo la susceptibilidad a grietas, deformaciones y otros problemas comunes. Además, se han desarrollado técnicas avanzadas de diseño de mezclas que tienen en cuenta las características específicas de las condiciones climáticas y del tráfico en Colombia.

Otro enfoque importante se centra en la implementación de sistemas de monitoreo y mantenimiento predictivo. Mediante el uso de sensores integrados en la superficie del pavimento, las autoridades pueden recopilar datos en tiempo real sobre su estado, permitiendo la detección temprana de posibles problemas. Esta información se utiliza para planificar intervenciones preventivas y programas de mantenimiento, lo que contribuye a prolongar la vida útil de las carreteras y a reducir los costos asociados con reparaciones mayores.

Asimismo, la tecnología de pavimentos permeables ha ganado relevancia en Colombia, especialmente en entornos urbanos. Estos permiten la absorción y filtración natural del agua de lluvia, reduciendo problemas de inundación y contribuyendo a la gestión sostenible del agua.

La tecnología que se ha desarrollado para pavimentos tiene como meta evitar deterioros y fallas, se han logrado establecer relaciones de causa efecto, para desarrollar normas de criterio de proyecto y conservación (Rodríguez, 1984).

En los pavimentos flexibles dado que permiten altas deformaciones comparados con otros tipos de pavimentos y el uso de las vías para cargas muy pesadas, se pueden presentar daños que van desde sencillas condiciones de desgaste de la rodadura, hasta fallas considerables en la totalidad de la estructura; se pueden realizar diferentes clasificaciones respecto a los daños según el parámetro u objetivo (Romero-Sarmiento, 2017)

Hay diversas técnicas como inventarios manuales e inspecciones visuales como lo son VIZIR y PCI, por otro lado, también hay otras que incluyen tecnologías como una red neuronal específica para el procesamiento digital de imágenes, ambas tienen el mismo objetivo evaluar e identificar las patologías existentes para de esta manera, escoger la solución más adecuada para cada situación.

6. Tipos de daños en pavimentos flexibles

Los principales deterioros en las vías en Colombia están clasificados de la siguiente manera:

6.1. Fisuras

- **Fisuras Longitudinales**

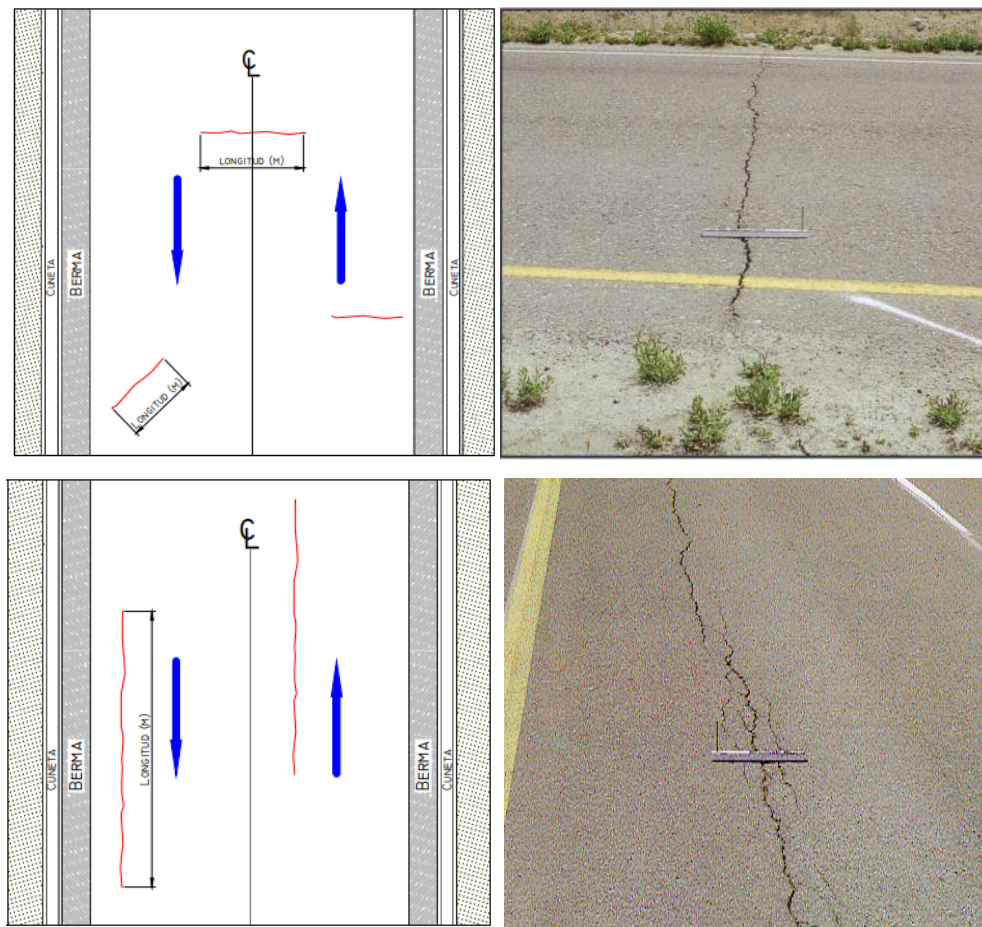
Las fisuras longitudinales son grietas o aberturas que se desarrollan a lo largo de la dirección de un pavimento o carretera. Estas divisiones se extienden paralelamente al eje de la carretera y pueden variar en longitud y anchura. Son una forma común de deterioro en pavimentos y pueden ser causados por diversos factores, como cargas repetidas, contracción térmica, fatiga del material, asentamientos diferenciales, o problemas en la construcción del pavimento. Son importantes de monitorear y reparar, ya que pueden comprometer la integridad estructural del pavimento. Si no se abordan a tiempo, estas fisuras pueden extenderse y convertirse en problemas más graves, como grietas más anchas o incluso la formación de baches. El mantenimiento preventivo y la identificación temprana de fisuras longitudinal (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2006).

- **Fisuras Transversales**

Las fisuras transversales son grietas o aberturas que se desarrollan perpendicularmente al eje de una carretera o pavimento, cortando transversalmente la superficie del mismo. Estas fisuras son perpendiculares a la dirección del flujo de tráfico. Al igual que las fisuras longitudinales, las transversales pueden variar en longitud y anchura.

Figura 1

Fisuras longitudinales y Fisuras transversales.



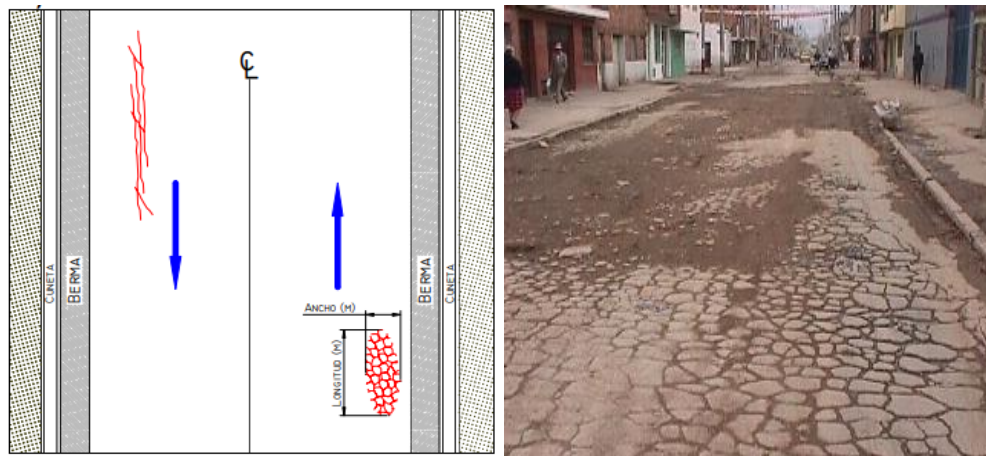
Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

- Piel de Cocodrilo**

Se refiere a un patrón de fisuras en la superficie que se asemeja a las escalas de la piel de un cocodrilo. Este fenómeno puede ser causado por varios factores, como el envejecimiento, la fatiga del material o tensiones repetidas en la superficie.

Figura 2

Piel de cocodrilo



Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

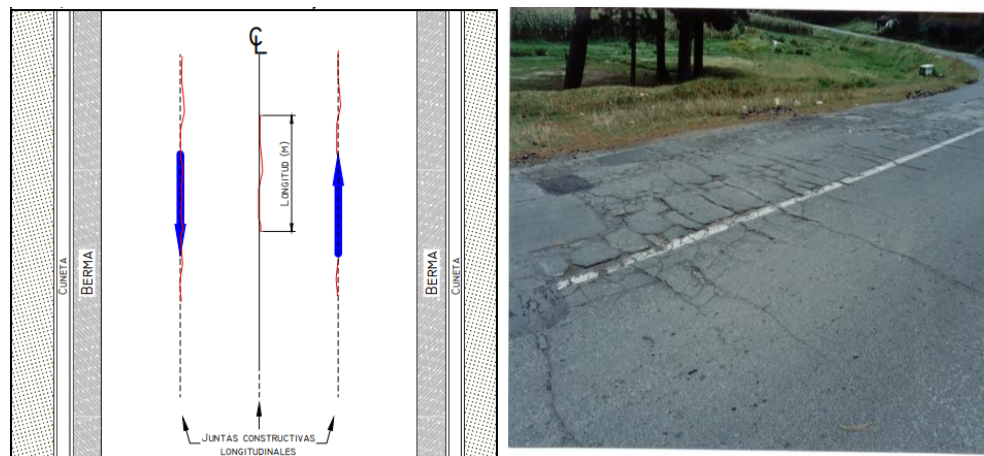
- **Fisuras en Juntas de Construcción**

Las fisuras en juntas de construcción se refieren a grietas o aberturas que se desarrollan específicamente en las áreas de juntas o conexiones entre elementos de una estructura. Estas fisuras pueden ocurrir en diversos tipos de construcciones, como edificios, puentes o pavimentos, y suelen manifestarse en lugares donde dos elementos estructurales se encuentran o están unidos.

Algunos de los factores que pueden contribuir al desarrollo de fisuras en juntas de construcción incluyen movimientos diferenciales, deformaciones estructurales y diseño Inadecuado de Juntas.

Figura 3

Fisuras en junta de construcción



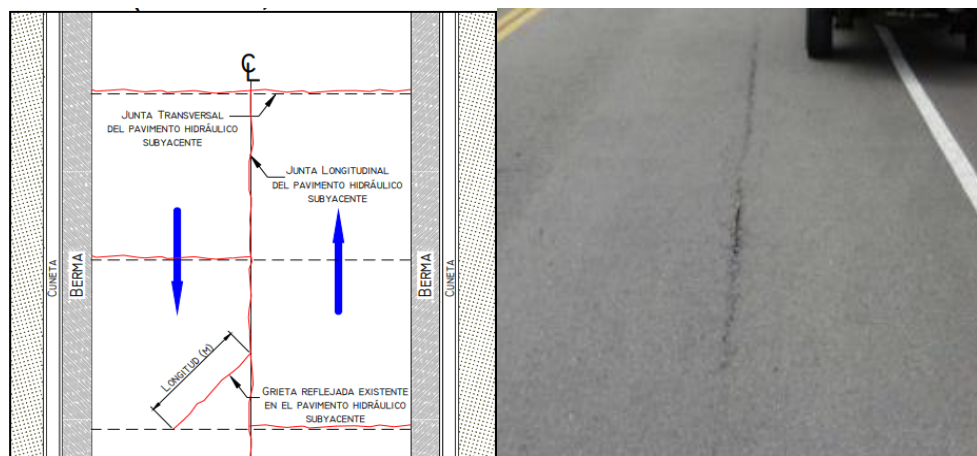
Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

- **Fisuras por Reflexión de Juntas**

Son también llamadas fisuras por reflexión de grietas, se producen en estructuras cerca de juntas existentes debido a tensiones en la interfaz de la junta, causadas por factores externos como cargas de tráfico, deformaciones estructurales o cambios ambientales

Figura 4

Fisuras por reflexión de juntas



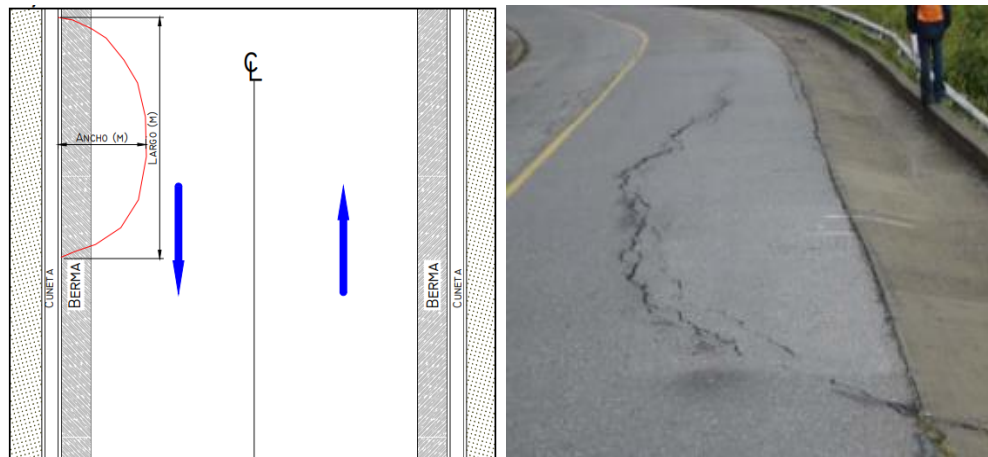
Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

- **Fisuras en Medialuna**

Son fisuras de forma parabólica asociadas al movimiento de la banca por lo que usualmente se presentan acompañadas de hundimientos.

Figura 5

Fisuras en medialuna.



Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

- **Fisuras de Borde**

Las fisuras de borde son grietas o fracturas que se desarrollan a lo largo del borde de una estructura, como un pavimento o una losa de concreto. Estas fisuras suelen manifestarse en el extremo de la superficie y pueden ser causadas por factores como la carga repetitiva, movimientos del suelo, cambios de temperatura o la falta de soporte adecuado en los bordes de la estructura.

Figura 6

Fisuras en borde



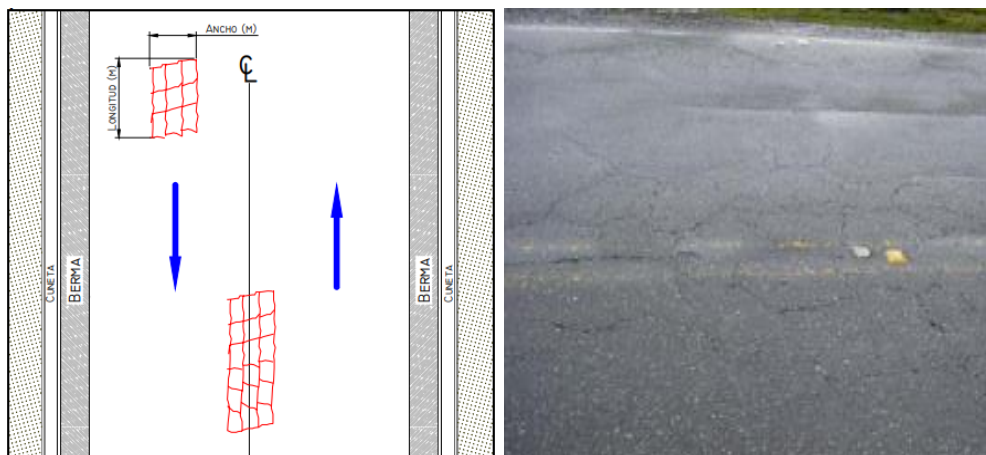
Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

- **Fisuras en Bloque**

Las fisuras en bloque se refieren a grietas o fracturas que se forman en patrones de bloque o segmentos en la superficie de un material, como el concreto o el asfalto.

Figura 7

Fisuras en bloque



Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

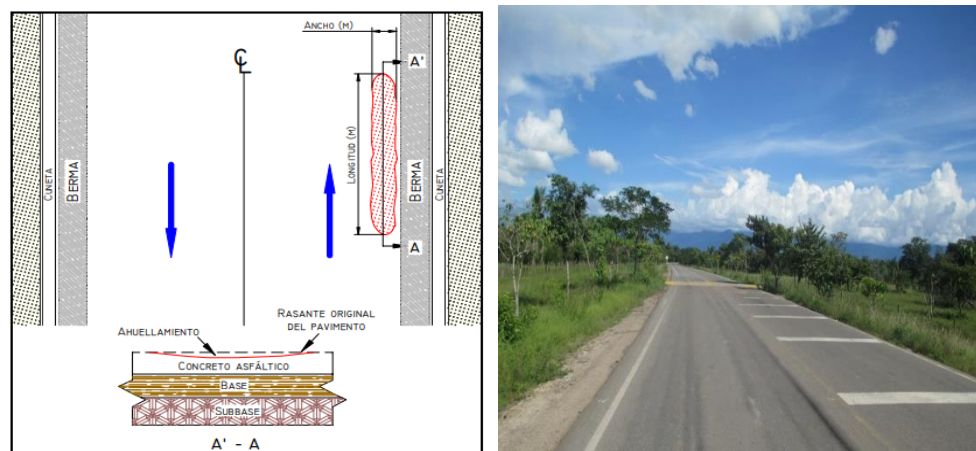
6.2. Deformaciones

- **Ahuellamiento**

Son hundimientos que se encuentran al nivel de la carretera, ubicados en la trayectoria de las ruedas de los vehículos. Cuando esta deformidad alcanza una severidad considerable, puede resultar en la falla estructural del pavimento o facilitar el riesgo de hidropelano, especialmente cuando se llena de agua.

Figura 8

Ahuellamiento



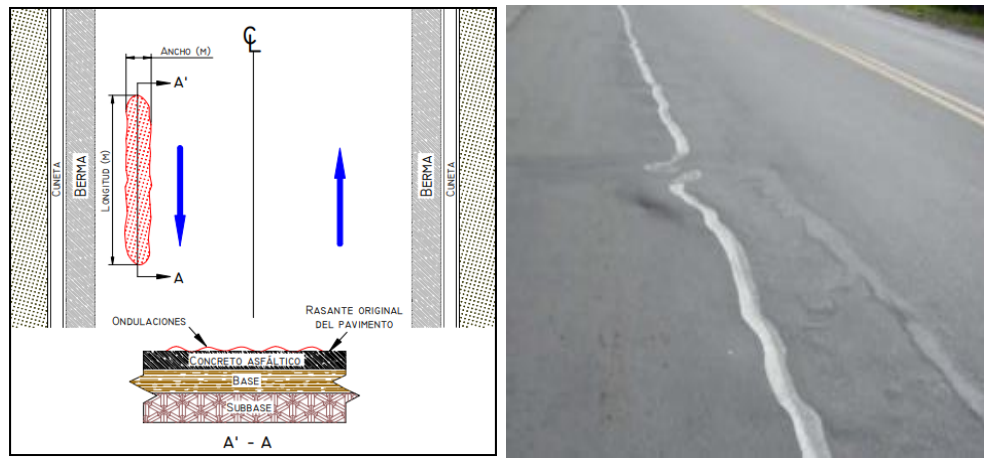
Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

- **Ondulación**

Se trata de una distorsión plástica en la capa asfáltica causada por la pérdida de estabilidad de la mezcla en climas cálidos, originada por una dosificación insuficiente de asfalto, la utilización de agregados redondeados o la presencia de ligantes blandos.

Figura 9

Ondulación



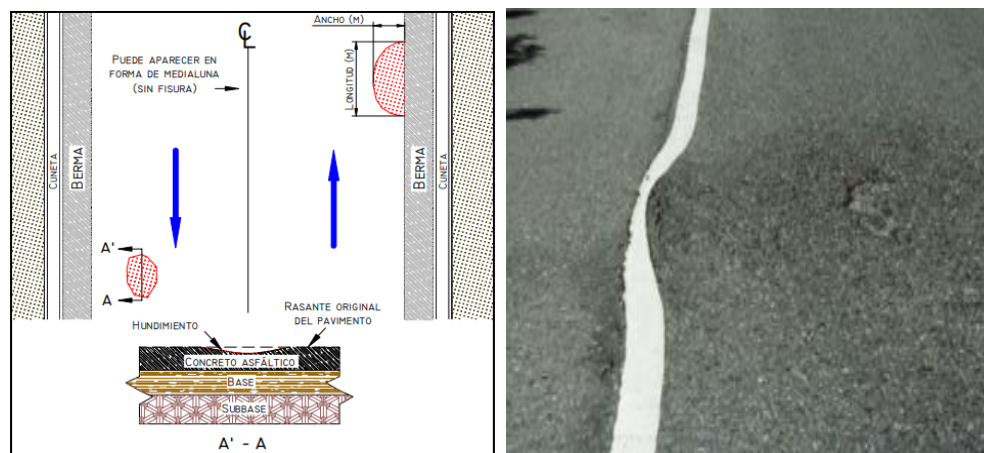
Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

- Abultamiento y hundimientos**

Son desplazamientos en su mayoría de forma pequeñas, bruscos, hacia abajo y hacia la parte superior del área del pavimento, que deforman el perfil de la carretera.

Figura 10

Abultamiento y hundimiento.



Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

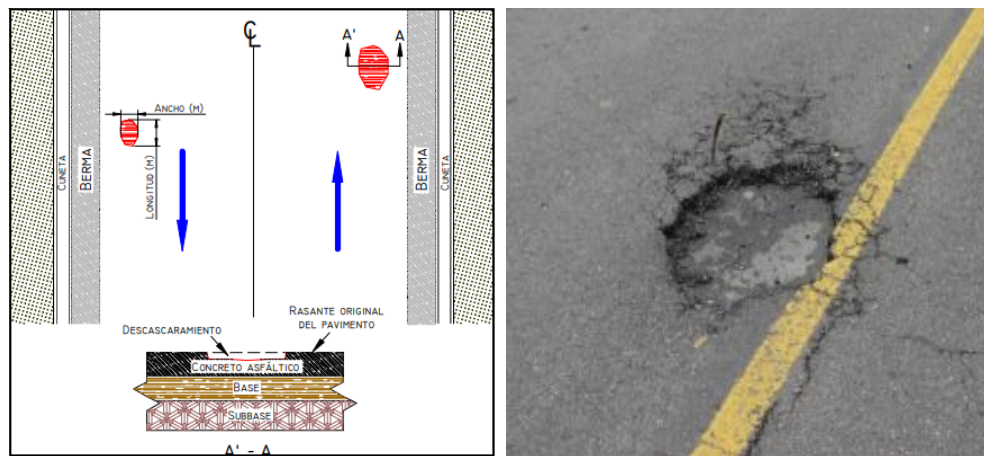
6.3. Pérdidas de la capa de la estructura.

- **Descascaramiento**

Corresponde al desprendimiento de partes de la capa asfáltica superficial, sin llegar a afectar las capas subyacentes.

Figura 11

Descascaramiento.



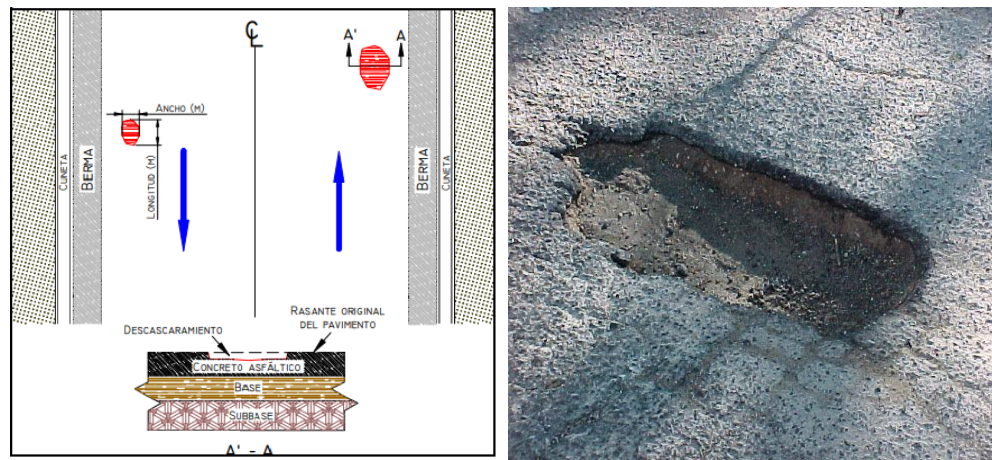
Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

- **Bache**

Un bache es un área de la superficie de la carretera que ha sufrido un colapso o deterioro, creando un agujero o depresión, generalmente causado por el desgaste, la erosión o daños en el pavimento.

Figura 12

Bache



Nota: Tomado de Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C

7. Metodologías de Evaluación en Pavimentos

La evaluación de patologías en pavimentos es esencial para mantener la integridad y seguridad de las infraestructuras viales. Diversas técnicas han sido desarrolladas para abordar la detección y análisis de posibles defectos. Desde enfoques visuales hasta herramientas avanzadas como inteligencia artificial, estas ofrecen un amplio espectro de técnicas para evaluar el estado de los pavimentos.

El método utilizado para la recolección de datos recogidos de las vías corresponde al compendio de información por observación y anotación en las planillas elaboradas para los métodos del Índice de Condición del Pavimento PCI y reconocimiento visual de áreas y rutas en riesgos VIZIR. Además, es importante aclarar que cada método estudiado (PCI y VIZIR) cuentan con un proceso de técnica para la selección de unidades de muestra que son parte de la práctica de evaluación, más aún si el control de las anomalías de las vías se presenta en toda su longitud (Paucar Curo, 2019)

Los principales enfoques para la inspección de las carreteras se dividen entre clases, inspecciones manuales, inspecciones automáticas e inspecciones basadas en vibraciones.

Los métodos manuales implican el desplazamiento de un vehículo a lo largo de la carretera, donde se identifican las imperfecciones del pavimento, se registran detalles como su ubicación, y el tipo de daño que se presenta. El resultado de este depende de la persona encargada de la inspección en ese punto.

Por otro lado, en los métodos automáticos, se introduce un vehículo con un sensor y cámaras adaptadas, para capturas imágenes de la superficie de la carretera, mediante ARAM, un dispositivo automático de análisis de carreteras, el cual utiliza técnicas de procesamiento de imágenes para detectar daños en el pavimento el cual emplea las redes neuronales.

Figura 13

Capturador de imágenes internacional cibernetics



Nota: Tomado de GEVIAL Ingeniería & Gestión vial S.A.S.

Las redes neuronales se aplican para la resolución de desafíos en la ingeniería de pavimentos, como el diseño y valoración de las mezclas asfálticas, la evaluación de permeabilidad y características mecánicas en los pavimentos.

7.1. Método VIZIR

El método VIZIR, es un sistema de auscultación francesa, que ofrece una evaluación y clasificación sencilla de la condición superficial de pavimentos flexibles. Este clasifica las fallas en dos categorías, Tipo A (de tipo estructural) y Tipo B (funcional). Los daños Tipo A indican deficiencia estructural, incluyendo deformaciones y agrietamientos por fatiga. Por otro lado, los daños Tipo B están relacionados con aspectos constructivos. Utilizando un equipo de medición básico, la metodología sectoriza los tramos de vía para calcular el Índice de Deterioro Superficial (IS), proporcionando una evaluación precisa del estado del pavimento ya sea en campo u oficina. (Mendoza, 2021).

1. Se comienza con una auscultación de los pavimentos para determinar los tipos de fallas, así como la gravedad y extensión de los mismo.

2. Se determina la gravedad del daño mediante la clasificación en Tipo A (estructurales) y Tipo B ((funcionales), Seguidamente se identifica el tipo de daño específico y la causa que lo origina con ayuda de la siguiente tabla:

Tabla 1.

Categoría y clasificación de daños Metodología VIZIR. (INVIAS 2006)

Tipo A	Ahuellamientos	Ahuellamiento
	Fisuras	Hundimientos transversales
	Bacheos y parcheo	Hundimientos longitudinales
Tipo B	Fisuras	Fisura longitudinal en junta
		Fisura transversal en junta
		Fisura de contracción térmica
		Fisura de borde
	Deformación	Deformación
	Desprendimientos	Perdida de película ligante
		Perdida de agregado
		Descascaramiento
	Afloramientos	Pulimiento de agregado
		Exudación
		Afloramiento de mortero
		Afloramiento de agua
	Otros deterioros	Desintegración de los bordes de pavimentos
		Erosión de bermas
		Segregación

Fuente: (Marrugo, 2014)

3. Después de clasificar la gravedad del daño se calcula el promedio ponderado de la condición global del pavimento.
4. Con el valor de G (valor promedio ponderado de la condición global), se revisa la tabla N°2 Aproximación del grado de deterioro, y se define el nivel de gravedad del daño.

Tabla 2.

Aproximación del grado de deterioro

Grado de deterioro	
Si $G > 1,5$	1
Si $G \leq 1,5 < 2,5$	2
Si $G \geq 2,5$	3

Fuente: (Marrugo, 2014)

5. Luego se aplica un Índice de corrección establecido por la Guía Metodología para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras.
6. Realizada la corrección, cuando corresponda, se obtiene el “Índice de Deterioro Superficial, (Is)”, el cual califica la calzada en la longitud escogida para el cálculo. El valor del Is varía entre 1 y 7 y, de acuerdo con el Instituto Nacional de Vías (INVIAS)

Tabla 3.

Estado de la superficie de pavimento por medio del Índice de Deterioro

Estado superficial	Rango (IS)
Bueno	0 - 3.
Regular	3 - 5.
Malo	3 - 7.

Fuente (Bermudez, 2006)

Valores del “Is” de uno (1) y dos (2): Simbolizan pavimentos con poca deformación, que muestran mejor aspecto general y que, posiblemente, no necesiten en el instante más que trabajos de mantenimiento que son de rutina (Apolinario Morales, 2012)

Valores del “Is” tres (3) y cuatro (4): Son pavimentos con que presentan fisuras que tienen origen estructural con pocas o ninguna imperfección, a su vez pavimentos sin fisuras que tienen imperfecciones de gran importancia; su estado superficial se puede considerar regular y

bastante degradado como para poner en funcionamiento métodos de rehabilitación de mediana intensidad (Apolinario Morales, 2012)

Valores del “Is” cinco (5), seis (6) y siete (7): Indician los pavimentos con fuertes deformaciones de origen estructural, cuyo deficiente estado superficial posiblemente requiera la realización de trabajos significativos de rehabilitación (Apolinario Morales, 2012)

7.2. Método de auscultación pavement Condition Index (PCI).

El Índice de Condición de Pavimento es una metodología ampliamente utilizada para la auscultación de pavimentos flexibles y rígidos por su fácil implementación debido a que no requiere equipo especializado.

En toda estructura de pavimento los deterioros que son producidos por la acción de las cargas del tráfico, clima y otros se pueden clasificar de acuerdo a su clase, severidad y cantidad presente, esta metodología se desarrolló para obtener un Índice de integridad estructural del pavimento tiene rangos de calificación de 0 a 100 en donde 0 es malo y 100 es excelente para evaluar tramos de vía (Diaz Cardenas, 2014)

Tabla 4.

Rango de Clasificación de metodología 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: (Diaz Cardenas, 2014)

7.3. Red de funciones neuronales de base radial (RBFNN)

Las inteligencias artificiales han surgido como herramientas poderosas en la evaluación de patologías en pavimentos. Mediante el uso de algoritmos avanzados, como redes neuronales, estos métodos son capaces de analizar grandes conjuntos de datos, imágenes y patrones para identificar de manera precisa y eficiente diversas anomalías en los pavimentos. (Sanchez, 2020). Las redes neuronales de base radial son métodos que facilitan el cálculo de la disminución de pavimento en las vías. Estas utilizan registros de las condiciones de la carretera de años anteriores, obteniendo información del estado del pavimento, historial de mantenimiento y foros de tránsito entre otras variables.

El sistema RBFNN utiliza un software de estadísticas SPSS el cual permitirá la estandarización de datos mediante ecuaciones estadísticas. El modelo desarrollado permite hacer predicciones sobre el deterioro de los pavimentos demostrando gran capacidad y flexibilidad en la muestra de resultados (Rosada & Arliansyah, 2018)

Cabe recalcar que La elección de la red neuronal específica depende de varios factores, como la complejidad de la tarea, la cantidad de datos disponibles, la capacidad computacional y los recursos disponibles. (Sanchez, 2020).

7.3.1. Metodología.

La metodología para la detección y clasificación de fallas en el pavimento consta de cuatro etapas: adquisición de las imágenes, procesamiento de las imágenes, detección de bordes y extracción de características y finalmente la clasificación del deterioro mediante RNA

❖ Adquisición de las imágenes.

El data set empleado en esta metodología, es de imágenes adquiridas mediante un vehículo, acompañada de una cámara, el cual se desplaza a una velocidad promedio de 25 km/h, preferiblemente después del mediodía, ya que en este horario se obtenían imágenes de mejor calidad y sin tanta sombra.

❖ **Procesamiento de imágenes.**

Para el procesamiento de imágenes primeramente se lleva a cabo un cálculo matemático para eliminar la distorsión angular que generaba la cámara, mejorar la calidad de las imágenes, y obtener un mejor contraste, y reconocer más fácilmente el tipo de daño en la carretera.

❖ **Detección de bordes.**

En este paso se utilizan una serie de ecuaciones matemáticas, para dividir las imágenes en fracciones pequeñas, con el fin de obtener mayor calidad de la misma, mediante un vector gradiente para observar y determinar líneas curvas y rectas, logrando obtener imágenes de mejor calidad y detalle.

También se pueden mejorar las imágenes a partir del relleno de vacíos y eliminación de ramas, para de esta manera conseguir imágenes para determinar longitudes correctas, que los daños que se hayan presentado en los pavimentos flexibles.

❖ **Extracción de características**

La extracción de características es un paso fundamental en la clasificación, ya que influye directamente en el rendimiento del clasificador. Este proceso disminuye la información y selecciona las características más relevantes de los datos originales.

❖ **Clasificación del deterioro mediante RNA**

Para la clasificación de los deterioros en las imágenes se utilizó una red neuronal MLP con algoritmo de aprendizaje Backpropagation. Por último, se hace la evaluación del deterioro, para obtener y relacionar las especificaciones del INVIAS.

La arquitectura con mejor desempeño para la clasificación de los deterioros presentes en el pavimento flexible es una red neuronal multicapa con configuración entrenada con el algoritmo de retro programación, en la cual se evidencio una precisión del 100% en la clasificación daños como piel de cocodrilo, grietas longitudinales, y de 80% para baches. Se sugiere que, para el sistema

propuesto, se le incorpore sistemas de iluminación para reducir los efectos de sombra en las imágenes. (Cifuentes, 2021)

8. Comparación de las metodologías VIZIR y Redes neuronales de base radial.

Tabla 5.

Comparación métodos VIZIR y Red de funciones neuronales de base radial.

Método VIZIR	Red de funciones neuronales de Base radial
Principio básico	
Clasificación de daños en tipo A y tipo B	Uso de algoritmos de aprendizaje automático para detección de patologías
Personal requerido	
Especialistas en pavimentos e ingenieros de carreteras para evaluación visual, técnicos de campo y analista de datos.	Un profesional con experiencia en el desarrollo y la implementación de modelos de funciones neuronales para proceso, especialista en pavimentos, técnicos de campo y analista de datos.
Equipo requerido	
Cámaras para evaluación visual y herramientas de medición estándar.	Hardware y software para entrenamiento y despliegue de modelos de redes neuronales.
Inversión inicial	
Bajo costo inicial en términos de infraestructura y formación de personal, generalmente centrada en capacitación y talento humano.	Mayor inversión inicial debido a la adquisición de hardware, software y necesidad de expertos en IA.
Costos operativos corto plazo	
Generalmente menores debido a la simplicidad y eficiencia en la implementación.	Pueden ser más altos debido al mantenimiento de la infraestructura de aprendizaje automático y actualizaciones tecnológica.
Costos operativos a lo largo del tiempo	
Mantenimiento relativamente bajo debido a la naturaleza menos tecnológica.	Pueden aumentar con el tiempo debido a la necesidad de actualizaciones, mantenimiento y entrenamiento constante de la red
Factibilidad a lo largo del tiempo	
Más accesible para aquellos con conocimientos básicos en pavimentos y sostenibles a lo largo del tiempo, especialmente en contextos con recursos limitados	Factibilidad dependiente de la evolución de la tecnología y la disponibilidad de recursos financieros y humanos para mantener y mejorar.
Adaptabilidad y escalabilidad	
Limitada adaptabilidad a cambios tecnológicos y dependiente del criterio de los analistas de datos	Mayor adaptabilidad y escalabilidad para enfrentar cambios y expandir capacidades, teniendo en cuenta requisitos técnicos y financieras
Sensibilidad a condiciones del entorno	
Menos sensible a cambios tecnológicos y actualizaciones a la red neuronal	Es más sensible y se beneficiara de avances tecnológicos continuos
Teniendo en cuenta la información anterior para evaluar de manera rápida y sencilla el estado de la capa de rodadura, es recomendable emplear el método VIZIR. Esta metodología destaca por su facilidad de comprensión y aplicación, ya que, al establecer un índice de calificación del pavimento, solo considera los deterioros de tipo estructural, clasificándolos en tres rangos. Sin embargo, se caracteriza por su baja objetividad, ya que evalúa la mayoría de los deterioros en unidades de longitud. Esto puede resultar en una calificación de severidad similar para una falla localizada en una sección estrecha de la vía en comparación con un daño que afecta todo el ancho de la calzada. Además, los deterioros de tipo funcional pueden ser relevantes hasta el punto de requerir una intervención urgente Por otro lado, Una investigación hecha en la Universidad de Cali por Lizette Tello Cifuentes, se obtuvo una exactitud del clasificador 95.56% y una precisión del 94.44%, para una red neuronal MLP, utilizando una metodología para la detección de grietas en el pavimento, técnicas de procesamiento de imágenes y redes neuronales artificiales. (Cifuentes, 2021).	

9 . Comparación de las metodologías PCI y Redes neuronales de base radial.

La evaluación de pavimentos mediante la metodología PCI y el uso de redes neuronales presenta diferencias significativas en diversos aspectos. En cuanto a recursos, la metodología PCI requiere hardware específico para la medición de patologías y software especializado para el análisis de datos, mientras que las redes neuronales exigen capacidades informáticas para el entrenamiento y aplicación de algoritmos. En términos de personal, la metodología PCI necesita especialistas en ingeniería de pavimentos para interpretar los resultados, mientras que el desarrollo y la implementación de modelos de redes neuronales requieren conocimientos en aprendizaje automático y análisis de datos.

En relación con las limitaciones, la metodología PCI puede depender de la subjetividad humana en la interpretación de resultados y puede ser más susceptible a errores humanos. Por otro lado, las redes neuronales pueden enfrentar desafíos relacionados con la necesidad de conjuntos de datos representativos y la complejidad en la configuración adecuada de los modelos. En términos de eficacia a largo plazo, la metodología PCI ha demostrado ser una herramienta sólida y establecida en la ingeniería de pavimentos, mientras que las redes neuronales, aunque prometedoras, pueden requerir adaptaciones continuas y actualizaciones para mantener su rendimiento óptimo.

En cuanto a la inversión inicial, la metodología PCI puede implicar costos asociados con equipos de medición y software especializados, mientras que la implementación de redes neuronales puede requerir una inversión inicial más significativa en hardware de alto rendimiento y el desarrollo de modelos específicos. En resumen, la elección entre la metodología PCI y las redes neuronales dependerá de factores como los recursos disponibles, la experiencia del personal y los objetivos específicos de la evaluación de pavimentos.

Conclusiones

La capacidad del modelo para predecir la condición futura del pavimento utilizando únicamente información del Índice de Estado del Pavimento (MCI) actual y la edad del pavimento sugiere que este enfoque puede ser una herramienta valiosa en la evaluación y gestión proactiva del estado de los pavimentos.

Las metodologías de evaluación de pavimentos, Pavement Condition Index (PCI) y las Redes Neuronales son herramientas que proporcionan a los profesionales la capacidad de determinar el tipo de mantenimiento necesario para los pavimentos, permitiendo un acceso más seguro a las carreteras. Las predicciones mediante Redes Neuronales y el uso del SPSS ofrecen modelos que tienen en cuenta factores clave, como el tiempo de vida actual y daños comunes, facilitando la detección y prevención de fallas.

Cuando se compara con la metodología PCI, esta última es un sistema muy completo. Considera todas las fallas presentes en la capa de rodadura, clasificándolas en 7 rangos de evaluación. Además, es una metodología objetiva que asigna calificaciones detalladas, tomando en cuenta el área de afectación y utilizando curvas de valores deducidos para determinar la severidad de las fallas. En consecuencia, se concluye que la Pavement Condition Index (PCI) se presenta como la metodología más completa y objetiva para la evaluación del estado de la superficie del pavimento.

Finalmente, destacar que la elección entre cual metodología escoger dependerá de varios factores incluidos recursos disponibles, la complejidad de la evaluación requerida y la predisposición a adoptar tecnologías avanzadas. La inversión inicial y la factibilidad a lo largo del tiempo deben calificarse en función de las necesidades y objetivos específicos de cada proyecto.

Bibliografía

- Apolinario Morales, E. W. (2012). *Innovación del Método Vizir en estrategias de conservación y mantenimiento de carreteras con bajo volumen de tránsito. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Lima]*. Repositorio. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/1315>
- Bermudez, V. G. (2006). *Evaluación y comparación de las metodologías VIZIR y PCI sobre el tramo de vía en pavimento flexible y rígido de la vía: Museo Quimbaya CRQ Armenia Quindio (PR0+000 - PR02+600). [Tesis de Especialiación, Universidad Nacional de Colombia]*. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2487/vivianaceronbermudez.2006.pdf?sequence=1>
- Cifuentes, L. T. (2021). *Detección de grietas en el pavimento usando técnicas de procesamiento de imágenes y redes neuronales artificiales.* <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/1565/1565>
- Diaz Cardenas, J. M. (2014). *Evaluación de la Metodología PCI como herramienta para la toma de decisiones en las intervenciones a realizar en los pavimentos flexibles.*[Tesis de pregrado, Universidad Militar]. Repositorio <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/12102/Evaluaci%F3n%20d;jsessionid=E571CE64C76F99932CF0762BC80E037C?sequence=1>
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2006). *Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles.* <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file>
- Marrugo, C. (06 de 2014). *Evaluación de las metodologías VIZIR como herramienta para la toma de decisiones en las intervenciones a realizar en los pavimentos flexibles. [Tesis de pregrado, Universidad Militar]*. Repositorio <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/12067/TG%20CEMM%20Codigo%206100153.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mendoza, 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. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional]*. Repositorio

- <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81189/1094933669-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Paucar Curo, E. F. (2019). *Evaluación de pavimentos flexibles y rígidos aplicando las metodologías de inspección visual de zonas y rutas en riesgo e índice de condición del pavimento para el mantenimiento vial, caso de la Av. Floral y Jr. Carabaya, Puno*. [Trabajo de grado, Universidad de Chile]. Repositorio <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3279847>
- Rodríguez, R. &. (1984). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas* (Vol. 2). Limusa.
- Romero-Sarmiento, D. (2017). *Cualificación cuantitativa de las patologías en el pavimento flexible para la vía Siberia – Tenjo de la Sabana de Bogotá*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica]. Repositorio <http://hdl.handle.net/10983/15274>
- Rosada, A., & Arliansyah, J. (2018). *Evaluación del deterioro del estado del pavimento en datos del índice de deterioro de la superficie (SDI) utilizando redes neuronales de función de base radial (RBFNN)*. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Rosada_2019_J._Phys._Conf._Ser._1198_032008.en.es.pdf
- Sanchez, J. (30 de 09 de 2020). *Evaluación de algoritmos de detección de objetos basados en deep learning para detección de incidencias en carreteras*. [Trabajo de grado, Universidad de Valladolid]. Repositorio. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/43277/TFG-G4450.pdf?sequence=1>