

# Gestión de pavimentos basado en sistemas de información geográfica (SIG): una revisión

## Pavement Management Based on Geographic Information Systems (GIS): A Review

Andrés Silva-Balaguera<sup>1</sup>✉, Omar Daza-Leguizamón<sup>2</sup>, Lesly Lopez-Valiente<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia



<sup>2</sup> Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

<sup>3</sup> Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

✉ Grupo de Investigación en Ingeniería Civil y Ambiental, Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Avenida Central del Norte n.º 39-115. Correo electrónico: andres.silva@uptc.edu.co

Recibido: marzo 15 del 2018

Aprobado: junio 20 del 2018

Disponible en línea: septiembre 1 del 2018

**Cómo citar este artículo:** A. Silva-Balaguera, O. Daza-Leguizamón y L. López-Valiente, "Gestión de pavimentos basado en sistemas de información geográfica (SIG): una revisión", *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 14, no. 26, 2018. doi: <https://doi.org/10.16925/in.v14i26.2417>

### Resumen

**Introducción:** artículo de revisión derivado del proyecto de investigación "Gestión de pavimentos basado en sistemas de información geográfica para la red vial de Boyacá" desarrollado en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en el año 2017.

**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.

**Conclusiones:** una metodología de gestión de pavimentos basada en SIG permite la optimización de costos priorizando los recursos en una red vial. Las bases de datos espaciales posibilitan una reducción en tiempos de procesamiento y facilidad de acceso a procesos futuros de los datos en la red vial, accediendo a una evaluación del pavimento de manera histórica y zonificada.

**Originalidad:** desarrollo de una metodología de gestión de pavimentos de fácil implementación.

**Limitaciones:** esta evaluación solo interpreta avances en gestión de infraestructura vial usando SIG.

**Palabras clave:** deflexión, georreferenciación, gestión de infraestructura vial, gestión de pavimentos, índice de condición del pavimento, metodología, regularidad, sistema de información geográfica.



## Pavement Management Based on Geographic Information Systems (GIS): A Review

### Abstract

*Introduction:* Review article derived from the research project “Pavement Management Based on Geographic Information Systems for the Road Network of Boyacá” conducted at the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia in 2017.

*Aim:* To identify practical improvements for road network maintenance, recognizing the main changes and suggestions in pavement management systems (PMS) for flexible pavement, as observed in international development.

*Methods:* The research was based on a qualitative document analysis, from which recently published articles of high impact journals were assessed, identifying the main contributions of geographic information systems (GIS) applied to flexible pavement management.

*Results:* GIS-based PMS enable economic administration of the road network, establishing a reduced pavement evaluation method and facilitating the selection of works in road sections faster and more economically. The importance of data collection, organization, verification, processing and appropriate presentation is also considered.

*Conclusions:* GIS-based pavement management method allows cost optimization, prioritizing resources in a road network. Spatial databases help reduce processing times and facilitate access to future data processes in the road network using a historical, zoned pavement evaluation.

*Originality:* Development of an easy-to-implement pavement management method.

*Limitations:* This assessment only interprets progress in road infrastructure management using GIS.

**Keywords:** deflection, georeferencing, road infrastructure management, pavement management, pavement condition index, method, regularity, geographic information system.

## Gestão de pavimentos baseada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG): uma revisão

### Resumo

*Introdução:* artigo de revisão derivado do projeto de pesquisa “Gestão de pavimentos baseada em Sistemas de Informação Geográfica para a rede rodoviária de Boyacá” desenvolvido na Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia em 2017.

*Objetivo:* identificar melhorias práticas para a manutenção da malha viária através do reconhecimento das principais mudanças e sugestões nos Sistemas de Gestão de Pavimentos (SGP) para pavimentos flexíveis, observados no desenvolvimento internacional.

*Metodologia:* a pesquisa baseou-se em uma análise qualitativa-documental, a partir da qual foram avaliados artigos de periódicos de alto impacto publicados recentemente, e foram identificadas as principais contribuições dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para a gestão de pavimentos flexíveis.

*Resultados:* os SGP baseados em SIG permitem a gestão econômica da rede rodoviária através do estabelecimento de uma metodologia de avaliação reduzida em calçadas, e a facilitação da seleção das intervenções em trechos rodoviários de forma mais econômica e rápida. Os SGP baseados em SIG consideram a importância da coleta, a organização, a verificação, o processamento e a apresentação adequada da informação.

*Conclusões:* uma metodologia de gestão de pavimentos baseada em SIG permite a otimização de custos e a priorização de recursos em uma malha rodoviária. As bases de dados espaciais permitem uma redução nos tempos de processamento e facilidade de acesso a futuros processos de dados na malha rodoviária, o qual possibilita uma avaliação de pavimento histórica e zoneada.

*Originalidade:* desenvolvimento de uma metodologia de gestão de pavimentos fácil de implementar.

*Limitações:* esta avaliação apenas interpreta o progresso na gestão da infraestrutura rodoviária usando SIG.

**Palavras-chave:** deflexão, georreferenciamento, gestão de infraestrutura viária, gestão de pavimentos, índice de condição de pavimento, metodologia, regularidade, Sistema de Informação Geográfica.



## 1. Introducción

La infraestructura debe estar en la mejor condición de funcionalidad para propiciar el desarrollo y el crecimiento económico de una región. En Colombia, la infraestructura vial está a cargo de las entidades públicas que tienen herramientas metodológicas para otorgar a los usuarios una red vial segura, cómoda y económica [1], de modo que la calidad, disponibilidad y pertinencia de los datos que se requieren para la implementación de dichas metodologías resultan de gran importancia.

Los métodos tradicionales de administración de la información para la gestión de carreteras no han permitido un acceso adecuado a dicha información por parte de las entidades que la requieren para adelantar proyectos de gestión de infraestructura. Para suplir esta falencia, Colombia ha iniciado la implementación de un sistema de información geográfica para el inventario de la red vial, denominando Hermes. Por otro lado, mediante Resolución 1067 de 2015 el Ministerio de Transporte [2] ha solicitado complementar el Sistema Nacional de Información de Carreteras (SINC), el cual se limita a inventario general de la infraestructura vial y de daños globales en la superficie del pavimento.

Con el apoyo de los sistemas de gestión de pavimentos (SGP), los administradores de las vías realizan actividades como monitoreo de la condición de un pavimento en la fase de posconstrucción, el mantenimiento y la rehabilitación con tratamientos especiales, y un análisis económico de alternativas. Según Vitillo [3], estos sistemas son la base en la toma de decisiones para optimizar las estrategias de mantenimiento en los pavimentos, buscando una condición servicial para un periodo de tiempo de diseño y al menor costo posible. El buen servicio de un pavimento es su capacidad para proporcionar a los usuarios comodidad, seguridad y economía. La recuperación del nivel de servicio de un pavimento en uso, por medio de obras de rehabilitación, se hace necesaria por una o más de las siguientes razones [1]:

- “Incomodidad para la circulación vehicular.
- Exceso de defectos superficiales.
- Reducción de la adherencia entre la calzada y los neumáticos de los vehículos.
- Necesidad excesiva de servicios de mantenimiento rutinario.
- Costos de operación elevados para los usuarios.

- Capacidad estructural inadecuada para las solicitudes del tránsito previsto”.

Los SIG facilitan el procesamiento y el análisis de datos georreferenciados, tienen una gran variedad de posibles aplicaciones y se han desarrollado rápidamente desde 1970 en términos de nuevas técnicas y capacidad de procesamiento, de acuerdo con Huismann y De By [4]. Los SIG tienen similitudes con los SGP en varios de sus componentes ya que los dos cuentan con subsistemas para la recolección, el procesamiento y la presentación de la información. Según Aronoff [5], los requerimientos para la puesta en marcha de un SIG son *hardware*, *software*, métodos y personal enfocado en las siguientes fases:

- “Captura y preparación de información
- Administración de información (incluido manejo y mantenimiento)
- Manipulación y análisis de información
- Presentación de la información (usuario del producto final)”.

Con un mantenimiento vial adecuadamente programado, formulado y adoptado, se asegura un buen estado de las carreteras en el tiempo, brindando la seguridad y la comodidad requeridas en su uso, siendo menores los costos y las reparaciones requeridas. Una buena base de datos obtenida a través de un SIG permite tener la información efectiva y ordenada, ya que se presenta como una herramienta útil en la administración de datos, con lo que se cumple lo dicho por Prieto [6]: “Los caminos son la cuerda de salvamento de una nación”.

## 2. Metodología desarrollada

Elegimos una metodología de análisis cualitativo-documental con enfoque evaluativo, propuesta por Gómez-Vargas et al. [7] en el 2015, para presentar el estado del arte en la aplicación de los SIG a la gestión de pavimentos. Se realiza recopilación de fuentes originales y actuales: principalmente artículos, libros y tesis de grado afines al tema de gestión de pavimentos basado en SIG y publicaciones encontradas en las bases de datos: Science Direct, Research Gate, Scopus y Engineering Village, entre otros.



**Figura 1.** Metodología cualitativo-documental. Presenta las fases desarrolladas en la revisión bibliográfica

Fuente: elaboración propia

Las investigaciones y/o publicaciones (artículos) de diferentes partes del mundo se clasifican en una matriz analítica de contenido. De cada texto se extraen los objetivos, las metodologías y los resultados obtenidos, dando prioridad a aquellos que desarrollan una afinidad completa del tema buscado, según lo establecido por Merino [8]. Así, los artículos se clasifican como:

- Categoría 1: La afinidad al tema es total y la revista es de alto impacto.
- Categoría 2: La afinidad al tema no es completa y la revista es de alto impacto.

**Tabla 1.** Matriz analítica de contenido

Número	Documento	Categoría 1*	Categoría 2	Observaciones**
A1	XX			
A2	YY			
A3	ZZ			
AN	AA			

\*La categoría 1 corresponde a total afinidad con el tema investigado.

\*\*Las observaciones comprenden los objetivos, la metodología y los resultados obtenidos en cada artículo.

Fuente: basado en Merino [8]

Así, se hace una evaluación de calidad de los artículos analizando su variabilidad, fiabilidad y validez. Finalmente, estructurando la información, combinando resultados de diferentes artículos y argumentando de manera crítica, se presenta el desarrollo y la discusión en la temática de interés.

### 3. Desarrollo SIG y SGP

A nivel mundial, el uso de SIG ha logrado importante aceptación debido a la facilidad de localización e introducción de información necesaria en la toma de decisiones para los proyectos. El modelo o sistema de datos georreferenciados permite el ingreso y el procesamiento de información en tiempo real acerca de parámetros establecidos en la evaluación del pavimento. Las aplicaciones de SIG con los SGP llegan a una selección o interpretación de la priorización de recursos que otorgan el mayor beneficio a la región. La facilidad de consulta del SIG brinda eficiencia en el manejo de información para las autoridades a cargo de la red vial, tal como lo describieron Adeleke et al. en el 2015 [9].

Los SGP se enfocan principalmente en dos niveles: nivel de red y nivel de proyecto. El nivel de red comprende toda la posible infraestructura a cargo de una entidad y el nivel de proyecto comprende un tramo definido dentro de la red o particular que requiere mayor detalle en la evaluación del pavimento para su intervención.

En los SGP, se analiza el tránsito promedio diario anual (TPDA) —como lo muestran Hafez et al. [10] en el 2017, Ibraheem y Al-Razzaq [11] en el 2012, Shamsabadi [12] en el 2014 y Fernández Seoane et al. [13] en el 2006— y se analiza una evaluación técnica del pavimento (funcional y estructural) —según Alfar [14] en el 2016, Higuera Sandoval [15] en el

2015 y Zumrawi [16] en el 2015—. El análisis del TPDA en los tramos viales ha permitido identificar las zonas con mayor influencia —como lo hicieron Chen et al. [17] en el 2014— y su distribución vehicular, debido al impacto que este genera en el pavimento, observado por Yut et al. [18] y Zumrawi y Margani [19] en el 2017. Como concluyeron Sitányiová y Mužík [20] en el 2013, estos estudios han permitido organizar el flujo de tránsito de tal manera que en la ciudad no se afecten tan rápido las estructuras de pavimento. Observando otros parámetros importantes en el análisis del estado del pavimento, se contempla la red vial y la condición topográfica de Nepal, similar a Colombia, donde se advierte que es importante evaluar la pendiente del terreno, debido a la estabilidad o susceptibilidad de falla en la infraestructura vial por los tipos de terrenos, según la investigación de Pantha et al. [21] en el 2010.

A fin de identificar mejoras prácticas para el mantenimiento de la red vial, se abordarán los aspectos más relevantes en los SGP como evaluación técnica del pavimento, aplicación del SIG al SGP, interpretación de las metodologías desarrolladas, estudios económicos y otras prácticas afines.

### 3.1 Evaluación técnica de los pavimentos

Los SGP se enfocan principalmente en parámetros que inciden en el pavimento como: tránsito, condición estructural (deflexión, módulo resiliente, estructuras de capas) y condición superficial del pavimento (regularidad, fricción y auscultación) [1], [10]. Estos parámetros permiten medir el estado del pavimento y prever las intervenciones a realizar para darle una mayor durabilidad a bajo costo.

#### 3.1.1 Daños en el pavimento

El parámetro con mayor uso para la evaluación del pavimento a nivel internacional es el índice de condición del pavimento (PCI, por sus siglas en inglés). En la Tabla 2, se muestran algunos daños presentes en el pavimento flexible.

El PCI fue desarrollado por la u.s. Army Corps of Engineers [23], y es una metodología de evaluación y clasificación de daños que mide de forma objetiva y ponderada los daños presentes en el pavimento. Se desarrolla con el tipo de daño y el nivel de severidad y densidad sobre el pavimento. Es un

indicador que va de 0 (falla) a 100 (bueno) y normalmente se evalúa en tramos seleccionados por el tipo de pavimento.

**Tabla 2.** Daños comunes en el pavimento flexible

Categoría	Tipo de daño
Grietas	Longitudinal, transversal, bloque, borde, reflectiva y fatiga
Deformación	Ahuellamiento, corrugado, depresiones y empuje
Deterioro	Baches, parches, pulimento, descascamiento, fragilidad (piel de cocodrilo inicial) y bombeo
Material inadecuado	Segregación y sangrado

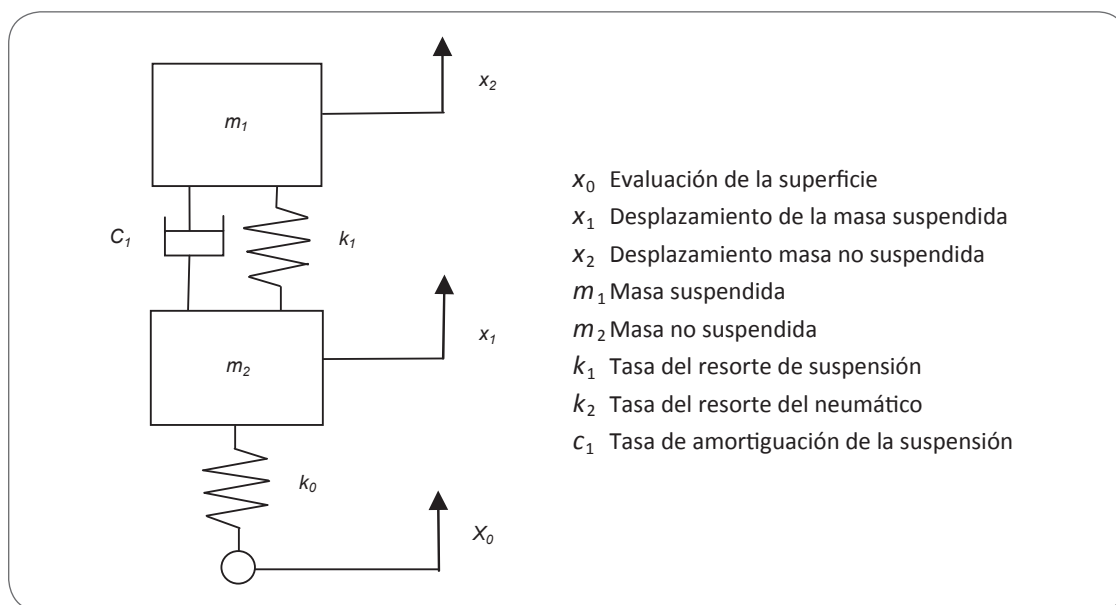
Fuente: basado en Kumar y Gupta [22], y en Zumrawi [14]

#### 3.1.2 Regularidad en el pavimento

El segundo parámetro más evaluado es el de regularidad, mediante el índice de regularidad internacional (IRI, por sus siglas en inglés; m/km) que se aconseja que sea menor a 1,5 m/km. El IRI modela un cuarto de carro a una velocidad de 80 km/h observando la variación del perfil en forma longitudinal, y fue desarrollado en 1986 con experimentos en vías de Brasil (1982) bajo el apoyo del Banco Mundial, según Lavaud [24].

#### 3.1.3 Fricción o rozamiento transversal

El coeficiente de fricción o rozamiento transversal se ha valorado con diferentes indicadores internacionales observando la micro y la macrotextura del pavimento. Su valor está conectado con la seguridad y representa la adherencia del neumático con el pavimento, de acuerdo con Alfar [16]. El *grip tester* es el más aplicado, con un sistema de deslizamiento fijo diseñado para rotar proporcionalmente a una velocidad diferente, produciendo un deslizamiento de 14,5% con respecto a las ruedas motrices; esta relación es el punto crítico de fricción máxima con el que se diseñan los sistemas de frenos antibloqueo de los vehículos para activarse y desactivarse. Normalmente, es evaluado con una película de agua de 0,25 mm debajo de la rueda (Plati y Georgouli [26]) y también es medido con el péndulo británico o la mancha de arena, según Zumrawi [15].



**Figura 2.** Modelo cuarto de carro. Muestra la estructura del equipo

Fuente: basado en Abulizi et al. [25]

### 3.1.4 Deflexión del pavimento (estructural)

La deflexión del pavimento no es un parámetro comúnmente medido cuando es una gestión a nivel de red debido a su alto costo, y a nivel de proyecto es esencial para seleccionar las intervenciones adecuadas al pavimento (los proyectos son tramos que se encuentran dentro de una red). La deflexión se define como el desplazamiento vertical de la superficie del pavimento en respuesta a la aplicación de una carga externa, y representa una respuesta total del sistema constituido por la estructura y la subrasante ante la aplicación de dicha carga. Cuando una carga se aplica sobre la superficie del pavimento, todas las capas se deflexan y se desarrollan esfuerzos y deformaciones en cada capa, como lo ilustra la Figura 3 [1].

Existen diferentes equipos de forma estandarizada para medir la deflexión a través de la aplicación de una carga y el registro de las deflexiones. Estos equipos, con una serie de sensores desplazados radialmente del centro de la carga, establecen lo que se conoce como el “cuenco de deflexión”. Los equipos más conocidos son el deflectómetro de rueda giratoria RWD (Rolling Wheel Deflectometer) [27] y el deflectómetro de impacto FWD (Falling Weight Deflectometer) [15].

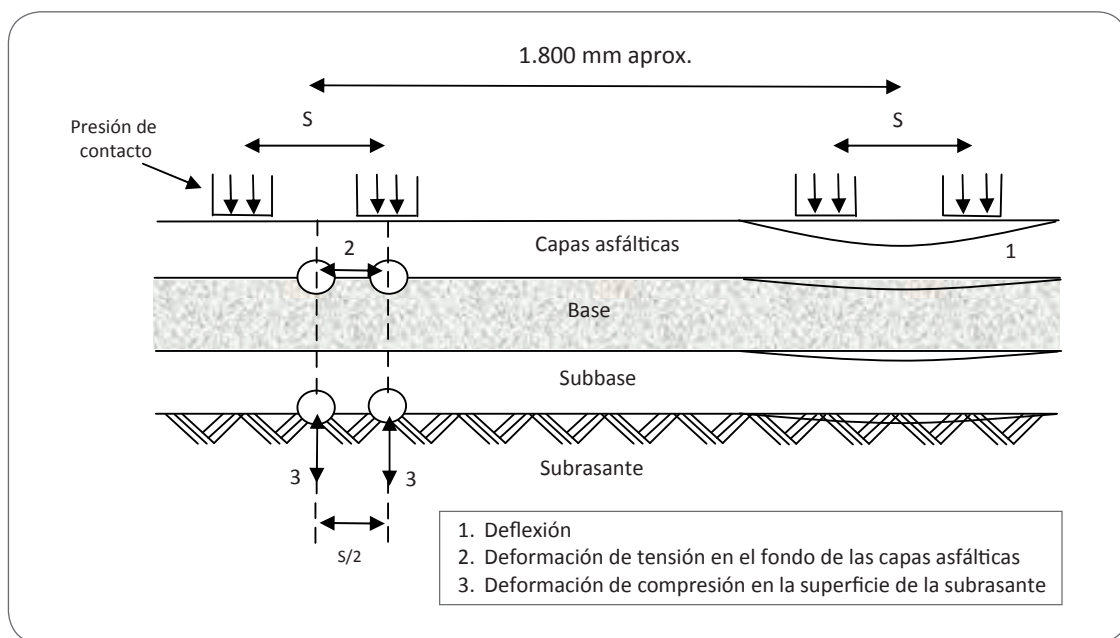
### 3.1.5 Evaluación geotécnica (estructural)

Aunque la premisa global en la gestión de pavimentos es conocer las propiedades y los indicadores de los pavimentos ya construidos, en algunos casos (organización o falta de información) se hace necesaria una evaluación geotécnica que permita identificar los espesores de las capas y sus características *in situ*. Se deben ubicar sondeos con ensayos destructivos y no destructivos, de acuerdo con la debilidad estructural (deflexión) y el nivel de degradación de la estructura, tal como lo plantea Higuera Sandoval [15].

## 3.2 Sistema de información geográfica aplicado a gestión de pavimentos

Los SIG aplicados a SGP son el principal objetivo de la mayoría de las entidades a cargo de la red vial en el mundo, en una fase inicial evaluando la condición del pavimento y priorizando con el mayor beneficio-costo (Hong et al. [28]) o con el manejo eficiente de recursos (Wisconsin Transportation Information Center [29]). Una importante recomendación se plantea en la evaluación temporal, como lo explica Fernández Seoane et al. [13] en el 2006, observando el comportamiento del





**Figura 3.** Deformaciones producidas por las cargas del tránsito

Fuente: basado en información del Ministerio de Transporte y el Instituto Nacional de Vías [1]

pavimento a largo plazo y optimizando aún más las intervenciones específicas por tramo vial.

Los SIG se han utilizado en la compactación de material granular en tiempo real, en la que realizan una geolocalización de la cantidad de pasadas de un compactador buscando la mayor eficiencia en el trabajo, como lo demostraron Li et al. en 1996 [30]. También se han utilizado en Beirut (Líbano), donde se implementaron en la recolección de información mediante capas relacionadas con diseño geométrico, obras, geotécnicos y ambientales (ruido), principalmente aplicados a la evaluación de la ruta, entregando una herramienta de decisión robusta, rápida y flexible, según Sadekl et al. [31].

En el 2006, en España se desarrolló una de las primeras aplicaciones del SGP con el SIG, inventariando la red vial y los parámetros del pavimento de forma dinámica (a través del tiempo). La base de datos tiene auscultaciones llevadas a cabo de 1995 a 2005, de acuerdo con Fernández-Seoane [13]. En Unlaanbaatar (Mongolia), actualizando el SIG en SGP, se identificó que la información se debe ingresar por puntos o nudos para un análisis adecuado, ya que de forma lineal presenta grandes variaciones. Para el análisis estructural, se calculó con el índice de defecto de 1 a 5 (malo a bueno), según

Sitányiová y Mužík [20]. Estas evaluaciones han encontrado intervenciones óptimas de aprovechamiento económico, priorizando las intervenciones en la red vial de una manera organizada y localizada, y así mismo generando una interfaz de visualización, análisis y actualización de la gestión de pavimentos amigable, de acuerdo con Fernández-Seoane et al. [13] y Sitányiová y Mužík [20].

En Reino Unido, se hace una valoración de cuatro expertos en los SGP, quienes según Alfar [16] encuentran: fortalezas en el análisis en forma lineal y en la organización de información; oportunidades en el constante mejoramiento por las autoridades competentes; debilidades en los beneficios directos a la comunidad (no ser aplicable debido a los costos requeridos y en especial a numerosos factores de evaluación); amenazas que se centran en la viabilidad del modelo por costos; y que en la ausencia de unos factores no se pueda usar el modelo.

La aplicación más detallada de estos sistemas se observa en los aeropuertos internacionales debido al tránsito y a las altas velocidades de las aeronaves. Un ejemplo de esta aplicación se realiza en España a cargo de la entidad Elimco Sistemas [32], y se denomina SIGES (Sistema de Gestión de

Estado Superficial). Elimco Sistemas, a través del inventario de desperfectos superficiales de los pavimentos, evalúa el PCI y el rozamiento o fricción planificando los mantenimientos de manera detallada.

En el aeropuerto de Shanghái, con la ayuda de SIG y GPS se recolecta, almacena, analiza y evalúa información, optimizando el mantenimiento del pavimento. Este sistema accede a una visualización y a una adecuada forma de análisis para la información del pavimento, pero debe ser detallada en tres ramas de pavimento (pista, rodaje y estacionamiento), así como en la sección y la unidad a evaluar, de acuerdo con Chen et al. [33].

En cuanto a costos de ciclo de vida del pavimento (diseño, extracción de materiales, equipo, estrategia de mantenimiento y rehabilitación), combinando el menor costo con el máximo beneficio (responsabilidad contractual al constructor, reducción del tiempo de viaje, confort y seguridad, intereses de los dineros no gastados, operación y mantenimiento de los vehículos e índice de deterioro del pavimento bajo), se observa que los costos más adecuados en el ciclo de vida del pavimento están en mantenimientos cada cuatro años y en rehabilitación cada diez años, según Babashamsi et al. [34].

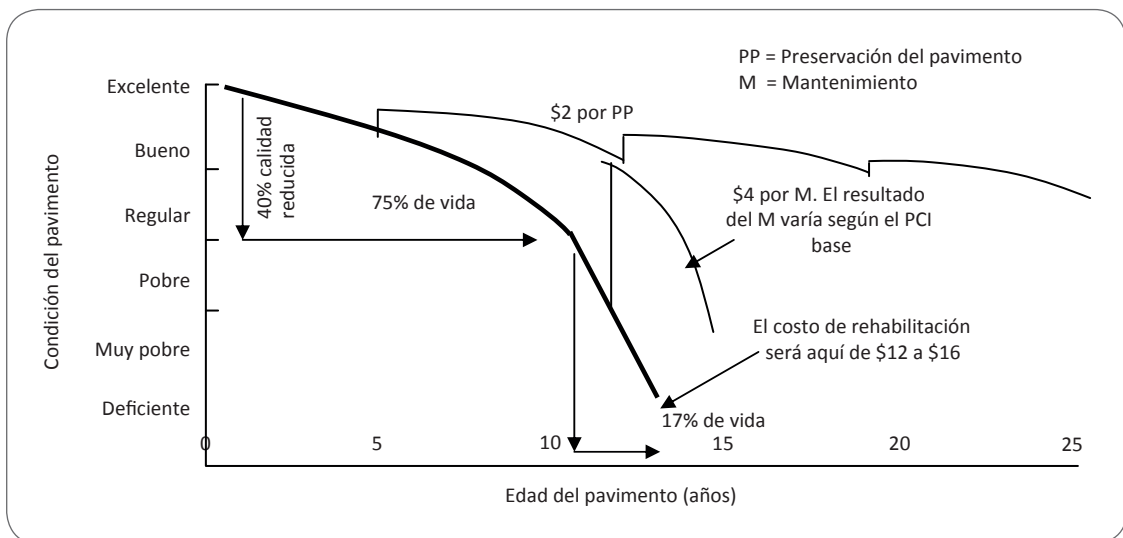
Como se muestra en la Figura 4, el daño del pavimento tiene una pendiente fuerte en el 17% de su vida final; mientras que en la fase inicial con

mantenimientos constantes y de bajo costo se llega a prolongar la vida del pavimento. Los costos promedio pueden ser de una a ocho veces el de una rehabilitación y hasta tres veces el de una reconstrucción en comparación con el costo de preservación, además de llegarse con la preservación a una mejor condición del pavimento, de acuerdo con Kelly et al. [35].

En Colombia, un principal avance a nivel de proyecto se observa en Medellín con evaluación funcional y estructural del pavimento. Se evaluó el índice de condición global o de serviciabilidad del pavimento y con una matriz de decisiones se estableció la intervención requerida discriminando el tipo de vía, tipo de pavimento e índice de serviciabilidad del pavimento, como lo registran Zapata-Duque y Cardona-Londoño [36].

### 3.3 Metodologías desarrolladas (SGP-SIG)

La gestión a nivel de red se ha desarrollado alrededor del IRI y el PCI; a nivel de proyecto o en ciudades que requieren un alto nivel de detalle, se ha evaluado conjuntamente la capacidad estructural del pavimento. En las diferentes metodologías desarrolladas, se establecen principalmente las fases de recolección de información, creación de bases de datos espaciales, análisis y procesamiento de mapas, y presentación de la información.



**Figura 4.** Deterioro del pavimento e implicaciones de las rehabilitaciones

Fuente: basado en Kelly et al. [35]



### 3.3.1 Recolección de información

En este marco, considerando el tránsito (TPDA) como parámetro constante de evaluación, identificaremos los diferentes parámetros del pavimento evaluados en los SGP, como lo indica la Tabla 3.

La recolección de información se ha realizado mediante monitoreo o identificación de daños en las superficies pavimentadas y no pavimentadas con cámara y GPS conectado a Google Drive (Ghazi et al. [42]), automatización de monitoreo con vehículos (Rusu et al. [43]) y recolección de datos con un iPad conectado al SIG para actualizar en tiempo real algunos de los daños presentes en el pavimento (Jiao et al. [40]); todas son herramientas de bajo costo y fácil acceso para las entidades encargadas en los SGP a desarrollar.

En Montería, Colombia, en el 2016, Maceamercado et al. [46] desarrollaron una nueva técnica de levantamiento de información mediante una motocicleta en la que se adapta un dispositivo que realiza toma fotográfica y georreferencia al sentir variación excesiva en la amortiguación; se rescata que a nivel de red brindaría una auscultación adecuada y de muy bajo costo.

Así mismo, se observan metodologías en la evaluación del IRI, como lo desarrollado en cuatro ciudades de Japón: se evaluó el IRI cada 100 m y durante cuatro años (2011-2013), identificando un aumento en el IRI cada año. Se detalla que evaluando dos líneas de perfil dentro y fuera de la llanta del vehículo se observa mejor condición del IRI fuera de la llanta, aunque no con mucha significancia, según Abulizi [25]. Una evaluación más simplificada se presenta con un vehículo (GPS, imágenes y láser calibrados, precisión de 10 cm) que realiza el modelamiento en tercera dimensión de una nube

de puntos, en el que se identifica con algoritmos el ahuellamiento, el IRI o daños del pavimento. Este tipo de modelos recolecta gran cantidad de información en poco tiempo, de acuerdo con Prieto [6]. Entre tanto, con la tecnología LIDAR y la regularidad superficial (promedio, cuadrado y sesgos), se ha avanzado en la clasificación de pavimentos urbanos (asfalto y pavimento en roca, tomando cada 7 cm un punto con precisión de 8 mm), como lo registran Díaz-Vilariño et al. [37].

### 3.3.2 Creación de base de datos espaciales (Geodatabase)

La información antes relacionada es organizada y estructurada para que el *software* o la entidad encargada interprete adecuadamente los diferentes parámetros presentes en el pavimento y se proceda al análisis [9], [17], [18], [20], [36], [39], [41], [43]. Es considerada la base de una adecuada administración, manejo y mantenimiento de la información por Huisman y De By [4] en el 2009. En nuevos adelantos, se propone conexión a la red de internet como lo hicieron Mohammed y Elhadi [47] en el 2009 [47], así como la actualización de datos en colaboración con otras aplicaciones propuesto por Ghazi et al. [40] en el 2014 y Jiao et al. [42] en el 2012.

### 3.3.3 Análisis de mapas, información recolectada e intervenciones preliminares a desarrollar

Con la información recolectada, se realiza la sectorización o selección de tramos a intervenir (método de diferencias acumuladas) [49] y se plantean las diferentes intervenciones según el estado

**Tabla 3.** Parámetros evaluados como base de los SGP

Parámetro evaluado	Obtención de información	Referencias
IRI	Evaluación del IRI, observando variación en aumento cada año y una evaluación al detalle para cada tramo evaluado.	[21], [25], [37]
PCI o daños superficiales	Evaluación de la condición superficial del pavimento en la red.	[9], [17], [19], [28], [38]-[44]
IRI y PCI	Comodidad del usuario y predicciones de los daños, regularidad y daños superficiales.	[6], [12], [13], [36], [45], [46]
Todas	Condición estructural y superficial.	[10], [18], [20], [27], [34], [47], [48]

Fuente: elaboración propia

del pavimento. En la evaluación a nivel de red, se selecciona de forma global la intervención (mantenimiento o rehabilitación), y a nivel de proyecto se presentan análisis como: relaciones entre los daños del pavimento, intervenciones recomendadas al pavimento, predicciones del avance de los daños, sensibilidad en las intervenciones seleccionadas por *software* y errores en la evaluación del pavimento por inadecuado procesamiento de información.

En el periodo 2006-2009, tras evaluar 1.500 millas en el estado de Nuevo México (Estados Unidos) se relacionan los daños que presenta el pavimento: se identifica una relación importante ( $R=0,8$ ) entre la piel de cocodrilo con las grietas transversales y longitudinales; y se establece que el deterioro es gradualmente más importante con el paso del tiempo y la influencia del tránsito, según Chen et al. [17]. Nebraska (Estados Unidos) estableció de manera particular una matriz de intervenciones para los daños de pavimento: interactuando con un SIG permite mejorar el tiempo de funcionamiento de la red vial, identificando la mayor

optimización en intervenciones, de acuerdo con Ibraheem y Falih [41].

El tratamiento más común para vías de bajo volumen ( $TPDA < 1200$ ) es sellado de fisuras y grietas, llenado de grietas y un reemplazo del pavimento hasta de 38 mm. Lo más efectivo es la reconstrucción del pavimento, seguido por reemplazo en parte y por el sellado de fisuras. Aplicar mantenimientos en vías severamente dañadas acarrea perjuicios económicos debido a que el plazo en pavimento adecuado es corto; se debe intervenir fuertemente, según lo recomendado por Hafez et al. [10].

Al detallar los diferentes niveles de mantenimiento que se pueden presentar en una red, como en la ciudad de Irdit en Jordania, donde el 70% de las redes son intervenciones diferentes, se puede observar la necesidad del cálculo de PCI (manual o *software*) y de una base de datos como herramientas eficientes para las entidades gubernamentales en la selección de intervenciones, como lo explica Bazlamit et al. [44]. Así mismo, si se da prioridad a la minería de datos del pavimento: clasificando,

**Tabla 4.** Matriz de decisión para el mantenimiento de pavimento flexible\*

Daños pavimento flexible	Bajo		Moderado		Alto	
	Ocasional	Frecuente	Ocasional	Frecuente	Ocasional	Frecuente
Piel de cocodrilo**	3, 1	3, 6	6, 3, 11, 4	6, 5	13, 6, 11	15, 13
Grieta de borde	1, 2	2, 1	2, 13	2, 13	13	13
Grieta longitudinal	2, 1	2, 6, 1	2, 6	2, 6	13, 2, 6	6, 2, 13
Aleatorio/Grieta en bloque	2, 1	2, 3	2, 6	2, 6	6, 11, 12	12, 6, 14
Descascamiento/ Envejecimiento	3, 1, 6	3, 6, 5	6, 7	6, 7	6, 11, 5	6, 12, 11
Deformación	1, 8, 13	13, 1, 8	8, 13, 6, 2	8, 13, 6, 2	8, 11, 6, 13	8, 14, 13
Ahuellamiento	1	1	8 + 6	8 + 6	8 + 6, 12	8, 14, 13
Exceso de asfalto	1	1, 6	6, 1, 8	6, 8	8 + 6	8 + 6 or 12***
Grieta transversal	2, 1	2	2, 6	2, 6	2, 6	2, 6, 13

Tratamientos de pavimento: 1) No hacer nada; 2) Sello/Relleno de fisuras; 3) Sello de riego negro; 4) Sello de arena-asfalto; 5) Lechada asfáltica; 6) Capa de sellado; 7) Tratamiento superficial; 8) Fresado; 9) Reciclaje en frío en el lugar; 10) Reciclaje en caliente en el lugar; 11) Superposición fina de mezcla fría; 12) Superposición fina de mezcla caliente; 13) Parcheo; 14) Superposición gruesa; 15) Reconstrucción total.

\*De acuerdo con las recomendaciones de los ocho superintendentes de Mantenimiento del Distrito y la División de Materiales e Investigación.

\*\*Cabe la posibilidad de que ineficiencias en los tratamientos que no sean 13, 14 y 15 serán mínimas y de corta duración.

\*\*\*Los proyectos del programa de extensión de pavimento son típicamente de dos pulgadas de grosor y se consideran el grosor máximo de este tratamiento.

Fuente: basado en Johanns y Craig [50]

agrupando, prediciendo numéricamente y estableciendo reglas de asociación basados principalmente en el PCI, se puede establecer una selección de intervenciones óptima, de acuerdo con Zhou et al. [39].

Se han determinado predicciones del PCI con SIG que permiten observar y planear geográficamente, con bases empíricas y teóricas de las vías como: clima, capacidad estructural de subrasante, tipo de pavimento, tipo de tratamiento y nivel del tránsito, según Hong et al. [28]. Una aplicación específica con respecto al clima (tormenta de nieve e inundaciones) se hace mediante una regresión escalonada del PCI, visualizando su comportamiento a futuro, además de identificar comportamientos asociados como el IRI con respecto al clima, tal como lo plantea Shamsabadi [12].

Al evaluar la sensibilidad del diseño de intervenciones con el *software* AASHTOWare Pavement ME Design, se establece principalmente la necesidad de calibración a la zona de aplicación, evaluando cada año su comportamiento y tomando datos estadísticos confiables. Una aplicación se observa en el análisis de 1.770 millas con 48 secciones de pavimento diferente en Connecticut (Estados Unidos), que permitieron crear una guía empírico-mecanicista de diseño para pavimentos con ahuellamiento, grietas longitudinales e IRI relacionado con variables como tránsito, distribución vehicular, clima, módulo y espesor de los materiales, según Yut et al. [18].

Tras evaluar estructural y funcionalmente el pavimento, con base en el tipo de estructura con baja capacidad estructural (caso 1) y el tipo de mayor capacidad de la requerida (caso 2) por el tránsito, se observa erróneamente que con la metodología de daños superficiales del pavimento las intervenciones a realizar no son adecuadas, dejando recuperación funcional para el caso 1 y estructural para el caso 2 en diseños específicos. Por tal razón, Zhang et al. [27] recomiendan usar siempre índices estructurales que conjuntamente con los índices superficiales permitan una adecuada intervención para preservación y rehabilitación del pavimento.

### 3.3.4 Presentación de información

Con la información adecuadamente ingresada en el *software* de visualización, se establecen puntos y tramos de parámetros evaluados en pavimento y posibles intervenciones por sectores. Esta

visualización mediante mapas es amigable para la interpretación del ingeniero a cargo de la gestión de pavimentos [9], [12], [17], [21], [31], [48].

La interpretación gráfica permite obtener patrones y relaciones que la estadística no muestra y colabora al juicio de expertos, según Mohammed y Elhadi [47] en el 2009. Si se completa históricamente con mantenimiento y construcción [44], [47], sincronización visual e información tabulada, y organizada y adecuada *geodatabase*, se establecen escenarios de mantenimiento y rehabilitación más certeros [47]. De igual forma, con un análisis severo en doble consulta (varios factores de afectación a la vía) se puede establecer un adecuado nivel de orden y mantenimiento del proyecto que con la jerarquía y la funcionalidad de las vías lleva a una optimización de las estrategias y costos finales, de acuerdo con Adeleke et al. [9].

La interacción carretera-operación-mantenimiento-mapa encuentra un uso favorable para la interpretación del ingeniero a cargo de la red vial. Incluyendo el PSI (Present Serviceability Index) como parámetro de evaluación del pavimento, se ha establecido un banco de información e interpretación en el tiempo del pavimento, identificando igualmente que tramos con PSI de 0 a 4 requieren intervenciones para su adecuado funcionamiento a futuro, como lo explican Ibraheem y Al-Razzaq [11] en el 2012.

### 3.4 Estudios económicos afines en la gestión de pavimentos

Para el año 2002, se implementó el *software* HDM-4 (Modelo de diseño y mantenimiento de carreteras), que permite planear y mejorar las condiciones de la infraestructura vial para países en desarrollo. Su uso es conveniente en el análisis económico y técnico, teniendo en cuenta factores climáticos, medioambientales, de seguridad vial, de congestión de tránsito, etc. Lleva a jerarquizar las inversiones en los proyectos carreteros, priorizando recursos a futuro; así mismo, desarrolla una gestión más amplia de carreteras bajo la planificación, programación, preparación y operación de estas. Aunque el *software* intenta modelar los costos, se deben desarrollar calibraciones para los países a aplicar.

En Medellín, Colombia, se establece particularmente una ecuación de predicción del consumo vehicular, bajo el análisis de tres factores cambiantes: velocidad, pendiente y peso del vehículo [51],

observando además que la mejor aplicación de los modelos de predicción de costos de operación se realiza con el modelo del HDM-IV, según Posada-Henao y González Calderón [52].

En Chile, se estudió una red de 399,4 km, observándose una intervención o mantenimiento general por tramos y priorizando recursos o mantenimientos a los caminos o tramos principales. El análisis con HDM-IV, con base en el inventario vial, el IRI y datos históricos, encuentra un escenario con la mejor condición de la infraestructura vial en cuestión de aprovechamiento monetario, como lo registran Pradena et al. [53].

En Bogotá, teniendo como base el *software* HDM-IV que permite realizar una evaluación económica año a año de los factores que inciden en una carretera, se contempló un inventario vial, de tránsito y de evaluación funcional y estructural del pavimento (PCI, IRI y deflexión). Así, se facilita la selección de actividades en la intervención del pavimento dentro de mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico, rehabilitación y reconstrucción, según Ríos y Martínez [54].

### 3.5 Otras prácticas de los SIG o SGP

En Penang, Malasia, se usa un SIG analizando y revisando su eficacia en la gestión de vías para asegurar un mantenimiento sistemático, con base geoespacial, de las vías de la ciudad realizando un inventario vial [55]. En Tunja, Colombia, se establece un SIG para la administración o toma de decisiones de la red vial con inventario de infraestructura y de daños (metodología de auscultación VIZIR), observando el estado superficial del pavimento y seleccionando un mantenimiento mínimo requerido, como registran Medrano y Serrano [56]; y en el Reino de Arabia Saudita se inicia la administración de la red vial mediante SIG, según Alsultana y Abdul Rahman [57].

Con imágenes tomadas, reportes de accidentes y GPS se genera un SIG, lo que permite un análisis espacial de los daños en el pavimento, así como la selección de las actividades de mantenimiento requeridas para aumentar la seguridad vial, de acuerdo con Obaidat y Al-kheder [38]. La inclusión del diseño geométrico vial para la seguridad vial encuentra los parámetros requeridos para una previsión de posibles accidentes, conectando los métodos estadísticos más usados para dicho análisis (Global Moran y Getis-Ord evalúan si son

aleatorios, dispersos o conjuntos). Con la localización de accidentes y puntos de accidentes cercanos, se convierten en una excelente herramienta de predicción que permitirá reducir la accidentalidad, según Satria y Castro [48].

De igual forma, en la provincia de Ilam, en Irán, se identifican patrones de accidentalidad relacionados con las lluvias y la topografía, observando afectación principal de ambas en los puntos de concentración de accidentes con las aglomeraciones determinadas por el método de Moran [58]. En Waikato, Nueva Zelanda, evaluando la serie histórica de accidentes otorgada por la Policía, se observó la necesidad de organizar la información; así, se integraron los principales factores actuantes de la vía en la seguridad vial mediante SIG. Se establecieron así las áreas de mayor riesgo y visualización de información del comportamiento de los conductores con respecto a la infraestructura, de acuerdo con Liu [59].

En Tanzania, se interpreta la seguridad con respecto al estado vial y la geometría de la red vial, se evalúan parámetros del pavimento (fricción, deflexión, condición superficial, etc.) en 3.000 km de red. Se establece que para proyectar con certeza las afectaciones de la vía con base en las condiciones encontradas, es mejor para periodos de tiempo cortos y se puede ir calibrando con auditorías de seguridad al paso del tiempo, según Amador-Jiménez y Pooyan Afghari [45].

## 4. Discusión

En los últimos años, los estudios del estado del pavimento han aumentado notablemente. Se observa un enfoque fundamental en los SGP con seguimiento y mantenimiento continuos, aumentando la vida del pavimento a bajo costo. Los SGP encuentran aportes significativos con la inclusión de una metodología SIG que facilita su análisis de manera general, simplificada, rápida y organizada.

Los SIG presentan importante utilidad en la representación gráfica de las vías presentes en una zona. La presentación de la información permite establecer en una determinada red o proyecto, con sistemas de colores o condiciones específicas, el estado o la necesidad que se requiere, así como establecer para determinados puntos o lugares de interés una especie de "libreta" o estructura

de información (*geodatabase*) que despliega su condición específica. La información es recolectada según la necesidad del proyecto a trabajar o las directrices del encargado del sistema para fácil interpretación, de acuerdo con Kmetz [60]. Entre los principales aportes del SIG a la gestión de pavimentos se encuentran los siguientes:

- “Capacidad de extracción rápida de información con facilidad de uso” [55].
- “Reduce los esfuerzos en recolección de información geoespacial” [55].
- “Se puede mejorar la actualización de datos, y la precisión y coherencia de la información presente” [55].
- “Se promueve la cultura para compartir información y trabajo en equipo” [55].
- “El mapa obtenido entrega información segura y más organizada” [55].
- Permite una selección de intervenciones de forma general y no únicamente localizada.
- Es apropiado para la integración carretera-operación-presentación, organizando y proyectando a futuro los datos o información del SIG.
- Entrega una presentación y evaluación confiable, siempre y cuando la información base sea proporcionada correctamente.

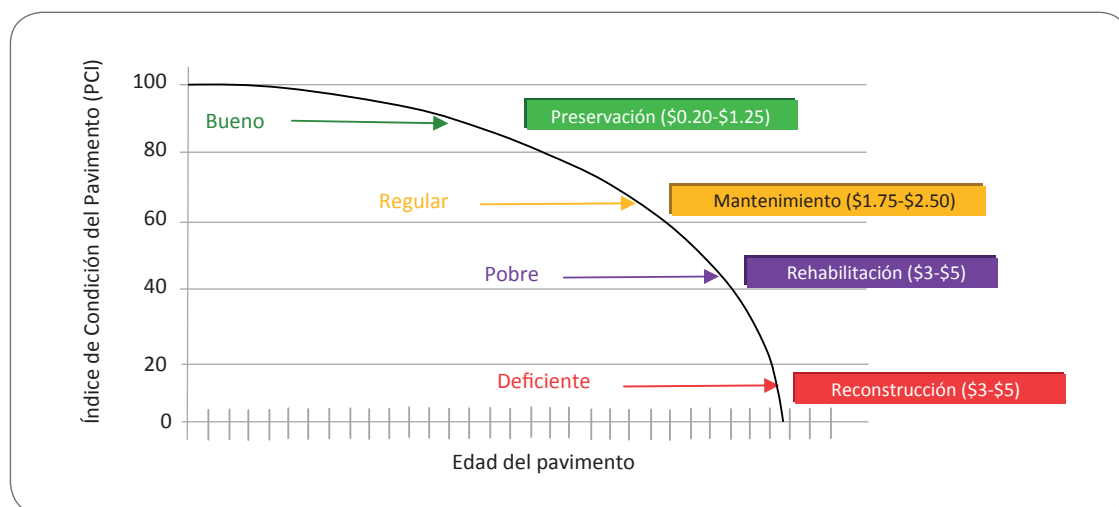
Al observar la mayoría de evaluaciones del pavimento con SIG, el parámetro de mayor uso es

el PCI. Se debe tener cuidado si se evalúa solo con este parámetro, pues como lo muestra la Figura 5, se pueden establecer acertadamente los límites de intervención (preservación y reconstrucción), pero en la zona media de la gráfica (PCI entre 70 y 30) se debe complementar con el análisis estructural para no incurrir en intervenciones inadecuadas como las que se han obtenido solo analizando el estado superficial del pavimento, como fue demostrado por Zhang et al. [27] en el 2014.

Aunque la aplicación de un solo parámetro como el PCI se ha desarrollado notablemente, cabe aclarar que como parámetro de análisis global o a nivel de red puede dar acercamientos a las intervenciones a realizar, pero no se debe tomar como la fuente final para la toma de decisiones en la intervención particular de cada tramo.

Finalmente, el sistema de evaluación recomendado requiere de la recolección de información de forma estandarizada, la adecuación de una base de datos espaciales, el procesamiento de mapas y la presentación de la información en los niveles de red y proyecto:

- A nivel de red, el sistema debe realizar una evaluación de carácter funcional con el IRI, observando así los puntos con mayor IRI, que seguramente presentarán daños en el pavimento y debilidad estructural. En la evaluación de red, se pueden seleccionar los tramos específicos a



**Figura 5.** Intervenciones a realizar según PCI (Los Ángeles-California)

Fuente: basado en [61]

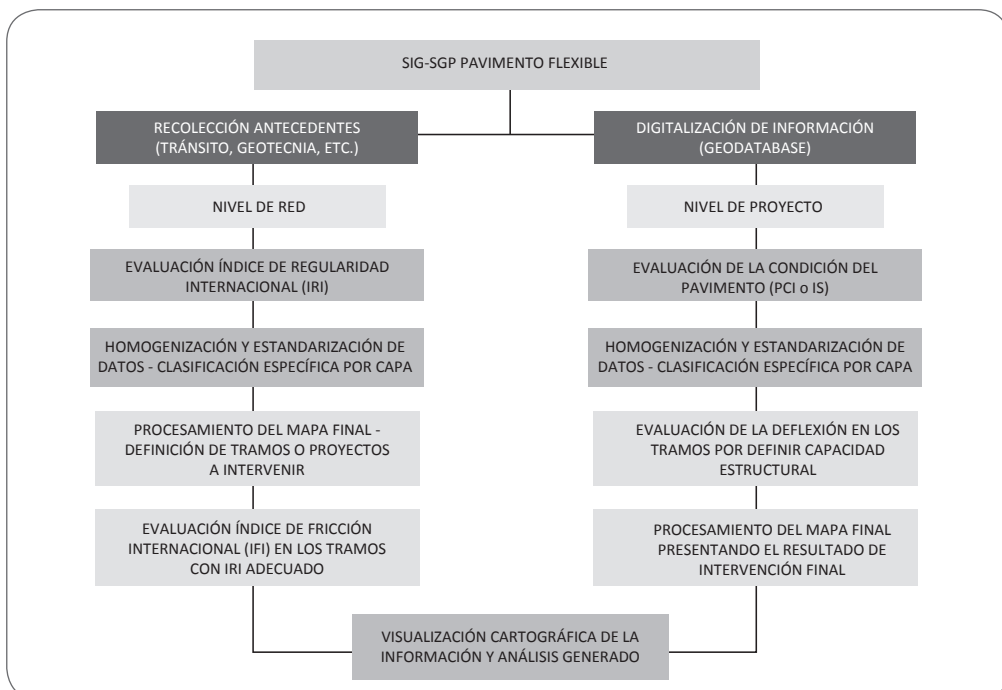
intervenir que deberán desarrollarse a nivel de proyecto.

- A nivel de proyecto, el sistema debe determinar claramente la intervención a realizar, ya sea mantenimiento o rehabilitación, cuya base de discriminación es un parámetro estructural como la deflexión o los módulos resilientes de las capas de pavimento. Para el caso de requerir únicamente mantenimiento, se deberá establecer con el PCI el tratamiento a realizar según los tipos de daños presentes en el pavimento. Si se debe rehabilitar, se recomiendan las metodologías de rehabilitación propuestas a nivel mundial valorando la capacidad estructural presente en el pavimento.

## 5. Conclusiones

- Una metodología reducida en la evaluación del pavimento facilita la selección de intervenciones en los tramos viales de manera más económica y rápida, considerando la importancia de la recolección, organización, verificación, procesamiento y adecuada presentación de la información; y facilita el trabajo del encargado de la gestión de pavimentos.

- La recolección de la información mediante una base de datos espaciales lleva a una reducción en tiempos de evaluación y a una facilidad de acceso en procesos futuros. El manejo de dicha información mediante SIG permite una evaluación del pavimento de manera histórica y zonificada.
- Se ha verificado que una gestión de pavimentos adecuada a la red vial permite reducir el costo en dos o hasta tres veces el valor de reconstrucción del pavimento, además de posibilitar el alcance de una mejor condición del pavimento que la obtenida por la rehabilitación; evidenciado finalmente en el aumento de la vida del pavimento.
- En la recolección del PCI en campo, puede desarrollarse una mejora importante si se permite que la comunidad comparta información en tiempo real con la base de datos. Las aplicaciones mediante teléfonos móviles, tabletas, internet, etc., facilitan la conexión siempre y cuando dicha información sea codificada y verificada por un experto para una alta confiabilidad.
- Las metodologías estadísticas para la selección de tramos, así como la observación de puntos críticos, son de útil aplicación para el encargado de la gestión de pavimentos, ya que le



**Figura 6.** Esquema propuesto para la gestión de pavimentos basada en sistemas de información geográfica en pavimento flexible

Fuente: elaboración propia



quitan subjetividad en la selección de intervenciones finales para los tramos viales.

- Cuando los parámetros de evaluación de la estructura (auscultación y deflexión) resultan en mal estado, se debe analizar únicamente su rehabilitación o construcción, ya que al mejorar su condición, se mejoraría directamente la condición funcional (regularidad y fricción). De esta forma, no habrá sobrecostos por recolección de información innecesaria.
- En la evaluación de la infraestructura, es obligatorio identificar los puntos críticos por drenaje (obras de arte, cunetas, bombeos, etc.), geología (fallas, materiales, etc.) y geotécnicos (taludes, licuefacción, etc.), los cuales son puntos que se deben intervenir previamente al mantenimiento específico de la estructura de pavimento.
- Para las entidades territoriales, se recomienda iniciar con la recolección y estandarización de información (*geodatabase*) para establecer un SGP basado en SIG que permita mejoras en las labores desarrolladas en la infraestructura a cargo. En su fase inicial, a nivel de red se recomiendan los parámetros como IRI o PCI, que históricamente revelen el comportamiento del pavimento.

## 6. Referencias

- [1] Instituto Nacional de Vías y Ministerio de Transporte, *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. Bogotá: Ministerio de Transporte, 2008 [En línea]. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/986-guia-metodologica-para-el-diseno-de-obras-de-rehabilitacion-de-pavimentos-asfalticos-de-carreteras>.
- [2] Colombia, Ministerio de Transporte (15 jun. 2015). Resolución 001067, Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras [En línea]. Disponible en: [http://www.nuevalegislacion.com/files/susc/cdj/conc/r\\_mt\\_1067\\_15.pdf](http://www.nuevalegislacion.com/files/susc/cdj/conc/r_mt_1067_15.pdf).
- [3] N. Vitillo, *Pavement Management Systems Overview*. New Jersey: Krieger, 2013.
- [4] O. Huisman y R. A. De By, *Principles of Geographic Information Systems: An introductory textbook*. Amsterdam: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 2009 [En línea]. Disponible en: [https://www.itc.nl/library/papers\\_2009/general/principlesgis.pdf](https://www.itc.nl/library/papers_2009/general/principlesgis.pdf).
- [5] S. Aronoff, "Geographic Information Systems: A management perspective". *Geocarto Int.*, vol. 4, no. 4, 1989. doi: <https://doi.org/10.1080/1010608909354237>.
- [6] B. R. Prieto, *Road surface structure monitoring and analysis using high precision GPS Mobile Measurement Systems (MMS)*. Pasig City: PASCO Philippines Corporation, 2015 [En línea]. Disponible en: [http://a-a-r-s.org/acrs/administrator/components/com\\_jresearch/files/publications/WE2-4-3.pdf](http://a-a-r-s.org/acrs/administrator/components/com_jresearch/files/publications/WE2-4-3.pdf).
- [7] D. A. Gómez-Vargas, M. Galeano-Higuaita y C. Jaramillo-Muñoz, "El estado del arte: una metodología de investigación". *Rev. Colomb. Ciencias Soc.*, vol. 6, no. 2, pp. 423-442, 2015 [En línea]. doi: <https://doi.org/10.21501/22161201.1469>.
- [8] A. Merino-Trujillo, "Cómo escribir documentos científicos (Parte 3). Artículo de revisión". *Salud en Tabasco*, vol. 17, no. 1-2, pp. 36-40, enero-agosto 2011 [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/487/48721182006.pdf>.
- [9] O. Adeleke, K. Stephen, J. Odumosu y H. S. Abdulrahman, "Application of GIS as support tool for pavement maintenance strategy selection", en Conference: 2015 NBRI International Conference, Abuja, 2015 [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/282643833\\_Application\\_of\\_GIS\\_as\\_Support\\_Tool\\_for\\_Pavement\\_Maintenance\\_Strategy\\_Selection](https://www.researchgate.net/publication/282643833_Application_of_GIS_as_Support_Tool_for_Pavement_Maintenance_Strategy_Selection).
- [10] M. Hafez, K. Ksaibati y R. Atadero, "Best practices to support and improve pavement management systems for low-volume paved roads — Phase I". *Int. J. Pavement Eng.*, pp. 1-8, mayo 2017, doi: [10.1080/10298436.2017.1316648](https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1316648).
- [11] A. T. Ibraheem y D. A. Al-Razzaq, "Applying Geographic Information System (GIS) for maintenance strategy selection". *Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 44-54, 2012, doi: <https://doi.org/10.4236/eng.2012.41007>.
- [12] S. S. Shamsabadi, "Design and implementation of Pavemon: A GIS web-based Pavement Monitoring System based on large amounts of heterogeneous sensors data", Tesis de maestría, Northeastern Univ., Massachusetts, Estados Unidos, 2014 [En línea]. Disponible en: <https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:349532/fulltext.pdf>.
- [13] L. Fernández-Seoane, V. Gómez-Frías, G. González, C. Millán y M. Sánchez, "SIG para la gestión de Firmes", en XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Bogotá, 2006 [En línea]. Disponible en: [http://www.age-geografia.es/tig/docs/XII\\_3/110%20-%20Fernandez%20Seoane%20et%20al.pdf](http://www.age-geografia.es/tig/docs/XII_3/110%20-%20Fernandez%20Seoane%20et%20al.pdf).
- [14] M. M. E. Zumrawi, "Survey and evaluation of flexible pavement failures". *Int. J. Sci. Res.*, vol. 4, no. 1,

- pp. 1602-1607, 2015 [En línea]. Disponible en: <https://www.ijsr.net/archive/v4i1/SUB15542.pdf>.
- [15] C. H. Higuera-Sandoval, *Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos*. Tunja: Editorial UPTC, 2015.
- [16] E. Alfar, *GIS-based pavement maintenance management model for local roads in the UK*. Salford: University of Salford, 2016 [En línea]. Disponible en: [http://usir.salford.ac.uk/39679/1/Final%20Version%20of%20Emad%20Alfar%20PhD%20Thesis\\_Emad%20Alfar%20PhD%20Thesis%201.pdf](http://usir.salford.ac.uk/39679/1/Final%20Version%20of%20Emad%20Alfar%20PhD%20Thesis_Emad%20Alfar%20PhD%20Thesis%201.pdf).
- [17] C. Chen, S. Zhang, G. Zhang, S. M. Bogus y V. Valentin, "Discovering temporal and spatial patterns and characteristics of pavement distress condition data on major corridors in New Mexico". *J. Transp. Geography*, vol. 38, pp. 148-158, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.06.005>.
- [18] I. Yut, J. Mahoney y D. A. Larsen, *Preparation of the implementation plan of AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (M-EPDG) in Connecticut: Phase II — Expanded sensitivity analysis and validation with pavement management data*. Connecticut: Connecticut Department of Transportation, 2017 [En línea]. Disponible en: <http://www.ct.gov/dot/lib/dot/documents/dresearch/CT-2293-F-17-1.pdf>.
- [19] M. Zumrawi y K. Margani, "Improving maintenance practice for road network in Sudan". *MOJ Civ. Eng.*, vol. 2, no. 6, pp. 1-7, 2017, doi: <https://doi.org/10.15406/mojce.2017.02.00054>.
- [20] D. Sitányiová y J. Mužík, "GIS application for managing and maintaining road network in Ulaanbaatar". *Silesian Univ. or Technol. Civil. Engineering*, no. 3, pp. 61-68, 2013 [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/283122753\\_GIS\\_application\\_for\\_managing\\_and\\_maintaining\\_road\\_network\\_in\\_Ulaanbaatar](https://www.researchgate.net/publication/283122753_GIS_application_for_managing_and_maintaining_road_network_in_Ulaanbaatar).
- [21] B. R. Pantha, R. Yatabe y N. P. Bhandary, "GIS-based highway maintenance prioritization model: An integrated approach for highway maintenance in Nepal mountains". *J. Transp. Geogr.*, vol. 18, no. 3, pp. 426-433, 2010, doi: [10.1016/j.jtrangeo.2009.06.016](https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2009.06.016).
- [22] P. Kumar y A. Gupta, *Case studies on failure of bituminous pavements. Compendium of papers from the First International Conference on Pavement Preservation*. Ottawa: National Library of Canada.
- [23] U.S. Army Corps of Engineers, *Unified Facilities Criteria (UFC) — Paver Asphalt Surfaced Airfields Pavement Condition Index (PCI)*. Washington D.C.: Department of Defense, 2001 [En línea]. Disponible en: [https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc\\_3\\_270\\_06\\_2001.pdf](https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_3_270_06_2001.pdf).
- [24] P. Lavaud, *Importancia de la regularidad superficial (IRI) en la construcción de pavimentos asfálticos en caliente*. Chattanooga: Roadtec, 2011.
- [25] N. Abulizi, A. Kawamura, K. Tomiyama y S. Fujita, "Measuring and evaluating of road roughness conditions with a compact road profiler and ArcGIS". *J. Traffic Transp. Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 398-411, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.004>.
- [26] C. Plati y K. Georgouli, "Field investigation of factors affecting skid resistance variations in asphalt pavements". *Balt. J. Road Bridg. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 108-114, 2014, doi: <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2014.14>.
- [27] Z. Zhang, K. Gaspard y M. A. Elseifi, "Evaluating pavement management treatment selection utilising continuous deflection measurements in flexible pavements". *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 414-422, 2014, doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.993198>.
- [28] F. Hong, E. Perrone, M. Mikhail y A. Eltahan, *Planning pavement maintenance and rehabilitation projects in the New Pavement Management System in Texas*. Austin: Texas Department of Transportation, 2001 [En línea]. Disponible en: <http://docs.trb.org/prp/17-02001.pdf>.
- [29] Wisconsin Transportation Information Center, "Asphalt Roads-PASER Manual", en *PASER Asphalt Roads Manual*. Madison: Wisconsin Transportation Information Center, 2002 [En línea]. Disponible en: <http://www.apa-mi.org/docs/Asphalt-PASERManual.pdf>.
- [30] C. Li, A. A. Oloufa y H. R. Thomas, "A GIS-biased system for tracking pavement compaction". *Autom. Constr.*, vol. 5, pp. 51-59, 1996 [En línea]. Disponible en: [https://ac.els-cdn.com/0926580595000194/1-s2.0-0926580595000194-main.pdf?\\_tid=13973bda-d931-11e7-b100-00000aab0f26&acdnat=1512419226\\_e66d2f2e9b06f8438264b211a08a16b](https://ac.els-cdn.com/0926580595000194/1-s2.0-0926580595000194-main.pdf?_tid=13973bda-d931-11e7-b100-00000aab0f26&acdnat=1512419226_e66d2f2e9b06f8438264b211a08a16b).
- [31] S. Sadek, I. Kaysil y M. Bedran, "Geotechnical and environmental highway layouts: An integrated GIS assessment approach". *JAG.*, vol. 2, no. 3, pp. 190-198, 2000 [En línea]. Disponible en: [https://ac.els-cdn.com/S0303243400850138/1-s2.0-S0303243400850138-main.pdf?\\_tid=e87d4abc-d92f-11e7-aae7-00000aacb362&acdnat=1512418725\\_fd-da692836a34dd9a84774843363b658](https://ac.els-cdn.com/S0303243400850138/1-s2.0-S0303243400850138-main.pdf?_tid=e87d4abc-d92f-11e7-aae7-00000aacb362&acdnat=1512418725_fd-da692836a34dd9a84774843363b658).
- [32] Elimco Sistemas, *Sistema de Gestión de Estado Superficial de los Pavimentos (SIGES)*, 2014 [En línea]. Disponible en: [http://www.elimco.com/p\\_Sistema-de-Gestion-de-Estado-Superficial-de-los-Pavimentos-SIGES-\\_58.html](http://www.elimco.com/p_Sistema-de-Gestion-de-Estado-Superficial-de-los-Pavimentos-SIGES-_58.html).
- [33] W. Chen, J. Yuan y M. Li, "Application of GIS / GPS in Shanghai Airport Pavement Management System".

- Procedia Eng.*, vol. 29, pp. 2322-2326, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.308>.
- [34] P. Babashamsi, N. Izzi, H. Ceylan y N. Ghani, "Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 241-254, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.004>.
- [35] G. Kelly, D. Delaney, G. Chai y S. Mohamed, "Optimising Local Council's return on investment from annual pavement rehabilitation budgets through targeting of the average pavement condition index". *J. Traffic Transp. Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 465-474, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.008>.
- [36] J. A. Zapata-Duque y G. J. Cardona-Londoño, "Aplicación de los sistemas de información geográfica para la gestión de la malla vial de la ciudad de Medellín". *Ing. USBMed.*, vol. 3, no. 2, pp. 70-84, 2012 [En línea]. Disponible en: <http://web.usbmed.edu.co/usbmed/fing/v3n2/v3n2a9.pdf>.
- [37] L. Díaz-Vilariño, H. González, M. Bueno, I. Puente y P. Arias, "Automatic classification of urban pavements using mobile LiDAR data and roughness descriptors". *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 208-215, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.199>.
- [38] M. T. Obaidat y S. A. Al-kheder, "Integration of geographic information systems and computer vision systems for pavement distress classification". *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, pp. 657-672, febrero 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.009>.
- [39] G. Zhou, L. Wang, D. Wang y S. Reichle, "Integration of GIS and data mining technology to enhance the pavement management decision making". *Transp. Eng.*, vol. 36, no. 4, pp. 332-341, abril 2010 [En línea]. Disponible en: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000092](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000092).
- [40] Y. Jiao, Z. Bowen y H. Siranc, "Study on the application of a management system for pavement based on iPad Terminal with GIS". *Inf. Tech. J.*, vol. 4, no. 11, pp. 520-523, 2012 [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/269655193\\_Study\\_on\\_the\\_Application\\_of\\_a\\_Management\\_System\\_for\\_Pavement\\_Based\\_on\\_iPad\\_Terminal\\_with\\_GIS](https://www.researchgate.net/publication/269655193_Study_on_the_Application_of_a_Management_System_for_Pavement_Based_on_iPad_Terminal_with_GIS).
- [41] A. T. Ibraheem y A. A. Falih, "Applying Geographic Information System (GIS) for maintenance strategy selection". *Engineering*, no. 4, pp. 44-54, 2012 [En línea]. Disponible en: [http://file.scirp.org/pdf/ENG20120100006\\_54343085.pdf](http://file.scirp.org/pdf/ENG20120100006_54343085.pdf).
- [42] K. Ghazi, S. Mustafa, N. Kokkas y M. Smith, "An approach to produce a GIS database for Road Surface Monitoring". *Procedia Soc. Behav. Sci.*, vol. 9, pp. 235-240, diciembre 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.01.042>.
- [43] L. Rusu, D. Sitar, S. Taut y S. Jecan, "An integrated solution for pavement management and monitoring systems". *Procedia Econ. Financ.*, vol. 27, no. 15, pp. 14-21, 2015, doi: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00966-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00966-1).
- [44] S. M. Bazlamit, H. S. Ahmad y T. I. Al-suleiman, "Pavement Maintenance Applications using Geographic Information Systems". *Procedia Eng.*, vol. 182, pp. 83-90, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.123>.
- [45] L. Amador-Jiménez y A. Pooyan Afghari, "Road safety and pavement management: A case study of Tanzania". *Balt. J. Road Bridg. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 132-140, 2015, doi: <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.17>.
- [46] L. F. Macea-Mercado, L. Morales y L. Márquez-Díaz, "Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vías de desarrollo". *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 17, no. 2, pp. 223-235, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.007>.
- [47] H. Mohammed y A. Elhadi, "GIS, a Tool for Pavement Management", Tesis de maestría, Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia, 2009 [En línea]. Disponible en: [https://www.kth.se/polopoly\\_fs/1.621699!/EX-0902.pdf](https://www.kth.se/polopoly_fs/1.621699!/EX-0902.pdf).
- [48] R. Satria y M. Castro, "GIS tools for analyzing accidents and road design: A review". *Transp. Res. Procedia*, vol. 18, pp. 242-247, junio 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.033>.
- [49] American Association of State Highway and Transportation Officials, *Design of Pavement Structures*. Washington D.C.: AASHTO, 1993 [En línea]. Disponible en: <https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>.
- [50] M. Johanns y J. Craig, *Pavement Maintenance Manual*. Lincoln: NDOR, 2002.
- [51] J. J. Posada-Henao, *Efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones John*. Medellín: Editorial UN, 2012 [En línea]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/8440/1/71687832.2012.pdf>.
- [52] J. J. Posada Henao y C. A. González-Calderón, "Consumo de combustible en vehículos para transporte por carretera —modelos predictivos—". *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 12, no. 23, pp. 35-46, 2013 [En línea]. Disponible en: <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/693/862>.
- [53] M. Pradena, J. Rivera y T. Echaverguen, "Metodología para la evaluación de proyectos de mantenimiento de caminos, utilizando el software HDM-4", en Primer Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Proyectos, Santiago de Chile, 2010 [En línea]. Disponible en: <http://www.ijopm.org/index.php/IJOPM/article/view/35>.

- [54] I. Martínez y J. Ríos, "Sistema de administración de pavimentos sobre la ciudad de Bogotá". *Rev. Univ. Nueva Granada*, vol. 3, no. 2, 2010 [En línea]. Disponible en: [http://www.umng.edu.co/documents/10162/745281/V3N2\\_28.pdf](http://www.umng.edu.co/documents/10162/745281/V3N2_28.pdf).
- [55] M. Zulkifli B., M. Yunus y H. Bt. Hassan, "Managing Road Maintenance using Geographic Information System Application". *J. Geogr. Inf. Syst.*, vol. 2, no. 4, pp. 215-218, 2010, doi: <https://doi.org/10.4236/jgis.2010.24030>.
- [56] C. Medrano y J. Serrano, *Inventario de infraestructura vial del casco urbano de Tunja en base de datos espaciales*. Tunja: Editorial UPTC, 2010.
- [57] S. H. Alsultana y A. Abdul Rahman, "Kingdom of Saudi Arabia Geospatial Information Infrastructure — An initial study". *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 40, pp. 95-99, octubre 2015 [En línea]. doi: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-2-W4-95-2015>.
- [58] M. A. Aghajani, R. S. Dezfoulian, A. R. Arjroody y M. Rezaei, "Applying GIS to identify the spatial and temporal patterns of road accidents using spatial statistics (case study: Ilam Province, Iran)". *Transp. Res. Procedia*, vol. 25, pp. 2131-2143, julio 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.409>.
- [59] W. Liu, "Enhancing Road Safety Management with GIS Mapping and Geospatial Database". *GHD*, pp. 1-9, 2013 [En línea]. Disponible en: [http://www.ghd.com/pdf/Enhancing\\_Road\\_Safety\\_Management\\_with\\_GIS\\_Mapping\\_and\\_Geospatial\\_Database.pdf](http://www.ghd.com/pdf/Enhancing_Road_Safety_Management_with_GIS_Mapping_and_Geospatial_Database.pdf).
- [60] R. J. Kmetz, *GIS based pavement maintenance: A systematic approach*. Indiana: College of Technology Directed Projects, 2011 [En línea]. Disponible en: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1036&context=techdirproj>.
- [61] Los Angeles County, *Pavement preservation*. Los Ángeles: Department of Public Works, 2017 [En línea]. Disponible en: <http://dpw.lacounty.gov/gmed/lacroads/TreatmentPavement.aspx>.