



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 22/ Edición N.44
Julio - diciembre 2025
Reia4417 pp. 1-28

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Ruiz Acero, J. C. y Gutiérrez Hortua,
D. A.

Evaluación del Índice de Condición
del Pavimento (PCI) Mediante
Sistemas de Información Geográfica
(SIG): Aplicación en el Tramo Cajicá-
Tabio (K0+000 a K2+000)

Revista EIA, 22(44), Reia4417 pp. 1-28
<https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1869>

✉ *Autor de correspondencia:*
Ruiz Acero, J. C.
Ingeniera Civil, Magister en
Ingeniería Civil.
Correo electrónico:
johanna.ruiz@unimilitar.edu.co

Recibido: 03-03-2025
Aceptado: 10-06-2025
Disponible online: 01-07-2025

Evaluación del Índice de Condición del Pavimento (PCI) Mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG): Aplicación en el Tramo Cajicá-Tabio (K0+000 a K2+000)

✉ JOHANNA CAROLINA RUIZ ACERO¹
DAVID ALFONSO GUTIÉRREZ HORTUA¹

1. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

Resumen

Las carreteras en cualquier país son fundamentales para el desarrollo en las ciudades, involucrando seguridad, salud, empleo y oportunidades económicas. El mantenimiento de estas es esencial para mantener los corredores transitables, previniendo accidentes, contratiempos o impases desafortunados. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han surgido como herramientas esenciales para la gerencia de pavimentos, permitiendo la visualización gráfica del estado de las vías y facilitando la toma de decisiones basada en datos geográficos. Estos sistemas integran datos del Sistema de Gerencia del Pavimento (PMS) y aprovechan avances tecnológicos para optimizar la planificación y el mantenimiento. Este estudio se enfoca en implementar un SIG para realizar un inventario vial detallado en el tramo Cajicá-Tabio, en Cundinamarca, Colombia, y de esta manera conocer el estado en el que se encuentra la vía del K0+000 a K2+000 por medio del Índice de Condición del Pavimento (PCI).

La implementación del SIG busca optimizar el uso de recursos públicos y mejorar la planificación de intervenciones de mantenimiento. En Colombia, la gerencia vial está a cargo de diferentes niveles administrativos, y la falta de actualización de inventarios viales ha dificultado la ejecución de proyectos. Este proyecto propone una solución mediante la creación de una base de datos geográfica actualizada y una interfaz intuitiva para la toma de decisiones. En resumen, la implementación de un SIG y la metodología PCI permitirán una gestión más eficiente de la infraestructura vial, mejorando la

calidad de vida de los habitantes y optimizando el uso de recursos públicos en la región de Sabana Centro.

Los resultados evidenciaron que de los 52 tramos evaluados, el 37% fueron clasificados como “Muy Malo”, el 38% como “Malo” y solo un tramo alcanzó la clasificación de “Excelente”. Esta clasificación permitió definir actividades específicas como mantenimiento rutinario, rehabilitación o reconstrucción, y facilitó su representación espacial mediante el SIG.

Palabras clave: Infraestructura vial, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Índice de Condición del Pavimento (PCI), Gestión de pavimentos, Mantenimiento vial, Inventario vial, Gestión de Infraestructura, Pavimento flexible, Sistema de Gerencia de Pavimentos (PMS).

Evaluation of the Pavement Condition Index (PCI) Using Geographic Information Systems (GIS): Application in the Cajicá-Tabio Section (K0+000 to K2+000)

Abstract

Roads in any country are fundamental for urban development, impacting safety, health, employment, and economic opportunities. Their maintenance is essential to keep corridors operational, preventing accidents, setbacks, or unfortunate disruptions. Geographic Information Systems (GIS) have emerged as essential tools for pavement management, enabling the graphical visualization of road conditions and facilitating data-driven decision-making. These systems integrate data from Pavement Management Systems (PMS) and leverage technological advancements to optimize planning and maintenance. This study focuses on implementing a GIS to conduct a detailed road inventory in the Cajicá-Tabio section, Cundinamarca, Colombia, and to assess the condition of the road from K0+000 to K2+000 using the Pavement Condition Index (PCI).

The implementation of GIS aims to optimize the use of public resources and improve the planning of maintenance interventions. In Colombia, road management is handled by different administrative levels, and the lack of updated road inventories has hindered project execution. This project proposes a solution through the creation of an updated geospatial database and an intuitive interface for decision-making. In summary, the implementation of GIS and the

PCI methodology will enable more efficient management of road infrastructure, improving the quality of life for residents and optimizing the use of public resources in the Sabana Centro region.

The results showed that out of the 52 evaluated segments, 37% were classified as “Very Poor”, 38% as “Poor”, and only one segment achieved an “Excellent” rating. This classification enabled the definition of specific actions such as routine maintenance, rehabilitation, or reconstruction, and was spatially represented using GIS, thereby optimizing decision-making.

Keywords: Road infrastructure, Geographic Information Systems (GIS), Pavement Condition Index (PCI), Pavement management, Road maintenance, Road inventory, Infrastructure Management, Flexible pavement, Pavement Management System (PMS).

1. Introducción

La condición de la infraestructura vial en una ciudad impacta directamente en diversos ámbitos de la calidad de vida de sus habitantes, incluyendo la seguridad, la salud, el empleo, las oportunidades económicas y las actividades recreativas (Hanák et al., 2014). A su vez, el mantenimiento de los pavimentos desempeña un papel crucial en las megaciudades lo que hace que la gestión eficaz de las reclamaciones y la programación de revisiones de carreteras sean dos aspectos prioritarios dentro del plan de mantenimiento del sistema inteligente de gestión de pavimentos. (Moradi & Assaf, 2023) (World bank, 2020) (ASCE, 2019).

Hafel et al. (2017), subrayan la importancia de las carreteras para el desarrollo económico, social, cultural y político de una región, ya que son esenciales para el movimiento de bienes y servicios, pero su desempeño se ve afectado negativamente con el tiempo debido a factores como el aumento del tráfico, el sistema de drenaje inadecuado y la baja calidad de los materiales que utilizan en las vías. Es por esto, que aumenta la importancia del mantenimiento de pavimentos desde el inicio de su vida útil (Jiale et al. 2022).

De ahí, que se hace necesario que la gerencia de pavimentos esté pendiente del estado de las vías en los países. Actualmente, indica que el mejoramiento está en el uso de herramientas con capacidades de uso de sistema geográfico y análisis espacial, dado que permiten la visualización gráfica del estado de las vías (Al-Neami et al., 2018);

esta es una de las razones por la que los sistemas de información geográfica (SIG) han venido tomando fuerza para planificar y resolver problemas de transporte. Siendo una herramienta imprescindible para la toma de decisiones en la gerencia de pavimentos. (Espejo & García, 2018) (Shahin, 2005).

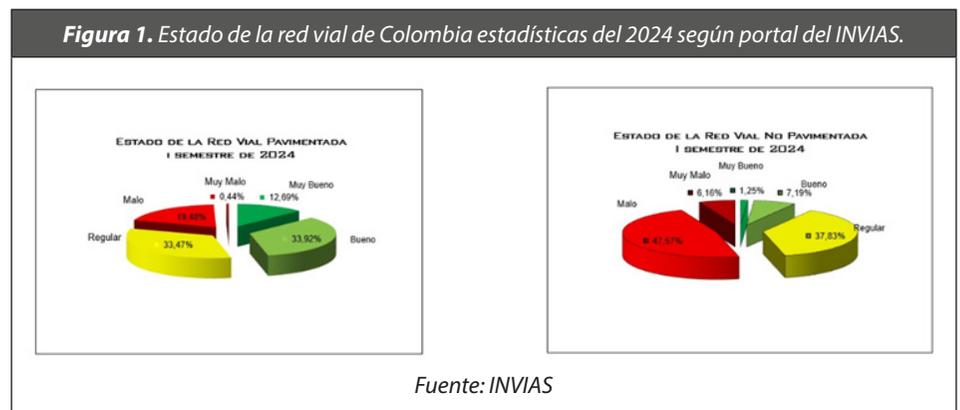
Los sistemas de Información Geográfica (SIG) emergen como la herramienta principal para optimizar la gerencia del pavimento, gracias a su capacidad para analizar datos geográficos, particularmente en lo que concierne a la inspección visual de las condiciones del pavimento (Flintsch & Bryant, 2012) (Miller & Bellinger, 2014). Por ejemplo, las agencias gubernamentales están progresivamente incorporando datos del Sistema de Gerencia del Pavimento (PMS) en los SIG, aprovechando la creciente prevalencia y el valor añadido que estos ofrecen, impulsados por los avances tecnológicos en hardware y software informático (Moradi & Assaf, 2023); prueba de ello es que, durante la última década, gran parte de los estudios de modelización urbana se han apoyado principalmente en datos aéreos y satelitales bidimensionales (2D). (Crommelinck et al. 2016).

Para Colombia, la administración vial es responsabilidad de la nación, los departamentos y los municipios. Cada uno de estos niveles administrativos se encarga de una malla vial que disminuye en calidad y categoría conforme se avanza del primero al tercero. En la actualidad, se calcula que el Sistema Nacional de Carreteras comprende 215.988 kilómetros de longitud, de los cuales 17.382 (8%) pertenecen a la denominada red de primer orden, administrada por el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI). La red vial de segundo orden comprende 44.399 kilómetros (21%) y la red de tercer orden comprende 154.207 kilómetros (71%) de carreteras privadas, las cuales se encuentran bajo la administración del gobierno. (Ospina, 2016).

Según Ospina en su artículo “El Papel De Las Vías Secundarias y Los Caminos Vecinales En El Desarrollo De Colombia” nos habla que en el 2008 el gobierno nacional adelanto el proyecto PVR (Plan Vial Regional) con el objetivo de apoyar a los departamentos en la creación de un inventario vial, en algunos de estos departamentos se crearon los inventarios se realizaron proyectos y se priorizaron

inversiones, pero también se dice que ninguno de estos inventarios ha sido actualizado y muchos de los proyectos no se ejecutaron. (Ospina, 2016).

Para Colombia la entidad principal del mantenimiento es el INVIAS que en su portal nos muestra una estadística del estado de la red vial en Colombia aunque solo de las vías primarias, este inventario lo realizan los administradores viales que como lo define en su plataforma: Son expertos en ingeniería civil, altamente capacitados para desempeñar roles de administración, gestión y planificación operativa y técnica, encargados de la dirección, coordinación y supervisión de las actividades cotidianas y regulares, así como otras tareas en pro de la conservación adecuada y oportuna de las carreteras. Se ocupan de la conservación, el inventario físico y estado de las carreteras, así como de la recopilación de datos para la base de datos de los accidentes. De ahí tenemos en la Figura 1 el estado de red vial pavimentada y no pavimentada, en donde se observa para el primer caso que en estado malo se tienen un 19,48% y en el segundo caso se tiene en estado malo un 47.57%.



Al considerar los aspectos municipales o técnicos del proceso de mantenimiento del pavimento urbano, resulta esencial determinar la condición de cada tramo de carretera y la tasa de deterioro del pavimento; esto permite planificar los costos financieros asociados a una estrategia de mantenimiento dentro de un programa de presupuesto municipal. Para lograr un diseño óptimo de rehabilitación estructural y anticipar las necesidades presupuestarias

futuras, es fundamental llevar a cabo una evaluación técnica de la calidad de la red vial. Colombia ha iniciado la implementación de un sistema de información geográfica para el inventario de la red vial, denominando Hermes en el cual en su portal nos muestra las vías Primarias existentes en el país y dándonos una serie de atributos guardados en un formato .shp como categorización nombre de la vía o tramo y material en la cual fue construida.

Como ejemplos a escala internacional, tenemos a Châteauguay, una ciudad pequeña y mediana de la provincia canadiense de Québec, tiene una red de carreteras de aproximadamente quinientos kilómetros y un valor de reparación de aproximadamente mil millones de dólares. La ciudad está experimentando un rápido crecimiento residencial e industrial. Debido a una red obsoleta, un mayor tráfico y numerosas carreteras, la degradación del pavimento se ha producido más rápidamente de lo previsto. El problema, como ocurre en otros municipios canadienses, es que el presupuesto anual es insuficiente para mantener estas carreteras en constante deterioro a un nivel aceptable. (Moradi & Assaf, 2023).

La toma de decisiones en los procesos públicos se ve restringida por presupuestos específicos asignados para proyectos de construcción, mantenimiento y reparación de la infraestructura vial. La priorización de proyectos emerge como un asunto crucial y desafiante que requiere ser abordado con eficacia para el desarrollo e implementación exitosa de un plan integral de infraestructura vial. (Jajac et al. 2015)

La implementación de un inventario vial en el sector de Sabana Centro, utilizando un SIG y la metodología del PCI, se justifica considerando múltiples aspectos: Según Silvar y Gualdrón en el año 2017, el uso de SIG a escala global ha ganado considerable reconocimiento debido a la sencillez de incorporar la localización de datos y la introducción de la información requerida en la toma de decisiones para los proyectos (Longley et al. 2015) (Tomlinson, 2013). El sistema georreferenciado de datos facilita la introducción y tratamiento de datos en tiempo real, basados en parámetros definidos en la valoración del pavimento (Silva & Gualdrón, 2017).

Un ejemplo de implementación de sistemas de gerencia de

pavimentos basados en la aplicación de SIG lo podemos ver en la investigación realizada por Palma en el año 2023 en la ciudadela el maestro de la ciudad de Portoviejo donde la salud de la red vial se determinó aplicando los métodos del PCI y Unsurfaced Roads Condition Index (URCI), tomando como muestra para la investigación un total de 38 tramos de inspección. De los cuales 25 tramos de la carretera estaban contruidos con un pavimento flexible y los otros 13 sin pavimentar. En esta investigación Palma, utilizo el software ArcMap como herramienta del sistema de gerencia de pavimentos con el fin de ayudar al ingreso y procesamiento de datos en tiempo real, después de realizar la inspección aplicando la metodología PCI creo una base de datos geográficos en la cual digitalizó los tramos de las vías dándoles una serie de atributos y así poder realizar una mejor interpretación y toma de decisiones mediante la representación en mapas dando una priorización de recursos. (Palma et al. 2023).

Isradi et al. (2023), realizaron evaluación detallada de las fallas funcionales y estructurales en los pavimentos viales en Indonesia. Para este estudio, los autores utilizaron índices como lo son el índice de capacidad de servicio actual (PSI), el índice de rugosidad internacional (IRI) y el índice de condición del pavimento (PCI), encontrando desniveles y daños directos en la superficie. Isradi et al. (2022), proporcionan información detallada sobre la evaluación de la condición de las carreteras en Indonesia, en donde analizan el estado del pavimento con el PCI y Los resultados permiten subrayar su utilidad en la gestión efectiva de pavimentos y en la mejora de la infraestructura vial urbana.

Asimismo, existen métodos de inspección de pavimentos como el de zonas e itinerarios de riesgo (Vizir), que se basa en evaluaciones visuales rápidas y recopilación de datos. No obstante, es menos detallado y preciso que el PSI y el PCI (Mamani Sánchez & Sifuentes Quiñones, 2021).

En el estudio realizado por Zapata y Cardona en año 2012 mencionan el principal elemento que se debe considerar en un sistema de gestión vial y es la recopilación de los datos en campo y partiendo de ahí realizar un inventario del estado actual de la malla vial. En su caso fue para la ciudad de Medellín. La mayor importancia

de su resultado fue un diagnóstico de la malla vial y la respectiva asignación de intervenciones en cada segmento de acuerdo a la matriz propuesta. (Zapata, 2012).

Por otro lado algunas investigaciones previas en el contexto que trata sobre la implementación de los SIG en los temas relacionados con vías, un artículo de revisión derivado del proyecto de investigación “Gerencia de Pavimentos Basada en Datos Geográficos” Sistemas de Información para la Red Vial de Boyacá, nos muestra que desarrollan una metodología que consta de las siguientes fases: La recolección de información, la creación de datos espaciales, procesamiento de mapas y la presentación de la información. De acuerdo con esto realizaron una recolección de datos en campo a partir de un monitoreo de las superficies pavimentadas y no pavimentadas con una cámara y un GPS conectado a Google Drive, además de un iPad con el cual usaban su herramienta SIG y actualizaban los datos en tiempo real; con esto se creaba una base de datos espaciales con la cual compilaban y analizaban los obtenidos en campo. Con esta información realizaron sectorización y selección de tramos a intervenir calculando la severidad de los daños encontrados, la presentación de estos datos fue mostrado a través de mapas con la cual se facilita la visualización de los tramos de vía y se pueden realizar mejores interpretaciones. (Silva et al., 2018).

En otra investigación llevada a cabo por Orrego en 2022, se presenta un estudio que busca sugerir que la gestión de pavimentos se lleve a cabo a través de la integración del SIG y PCI, con el objetivo de preservar la Av. Marañón, Los Olivos, Lima. En esta investigación, elaboraron completamente con el software ArcGIS la localización del área de estudio, la orientación del flujo de vehículos y finalmente, las características de tránsito de la vía a través del recuento vehicular de una semana. Posteriormente, se determinó a través del ArcGIS y el dron Phantom 4 el tipo de daño, la gravedad, la densidad, el valor deducido y el valor deducido correctamente, resultando en un Índice de Condición del Pavimento PCI de 31.76 (estado: malo). (Orrego, 2022).

Esta situación representa una brecha de conocimiento y gestión que limita la toma de decisiones basada en datos. La ausencia de información técnica actualizada impide la priorización eficiente de recursos, el diseño de intervenciones adecuadas y la mejora

del servicio vial. En este contexto, la presente investigación busca ofrecer una contribución original al proponer una metodología para evaluar el estado del pavimento mediante el uso combinado del Índice de Condición del Pavimento (PCI) y herramientas SIG, aplicada específicamente a un tramo representativo de la región.

Según lo anteriormente dicho, los objetivos de esta investigación se encaminan a Implementar un Sistema de Información Geográfica (SIG) para realizar un inventario vial detallado en el tramo Cajicá-Tabio (Cundinamarca, Colombia), utilizando la metodología del PCI para mejorar la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial, clasificar y calificar los segmentos de pavimento mediante el PCI para integrarlos en un SIG, desarrollando una interfaz intuitiva que facilite la visualización, análisis espacial y seguimiento del estado de los pavimentos, junto con protocolos de actualización periódica para garantizar la relevancia y eficacia del sistema en la gestión vial.

2. Metodología

2.1. Datos y herramientas geoespaciales

Para la ejecución de esta investigación se utilizó una combinación de fuentes geográficas y herramientas tecnológicas. Se empleó el software ArcMap, junto con el complemento Google Street View y el plugin de Google Earth, permitiendo la visualización remota del estado de la vía. Los insumos geoespaciales fueron obtenidos de las siguientes plataformas oficiales: ERMES (INVIAS), DANE, Colombia en Mapas (IGAC).

Ambas bases fueron importadas, unificadas y organizadas en una Geodatabase (GDB), desde donde se extrajo la vía de interés para esta investigación.

2.2. Área de estudio

El tramo seleccionado para la evaluación corresponde a la vía Cajicá-Tabio, en el departamento de Cundinamarca, Colombia, entre los kilómetros K0+000 y K2+000. La vía se caracteriza por un tránsito vehicular medio-alto y presenta un pavimento flexible asfáltico. Este tramo inicia en las coordenadas 74°4'3.531"W, 4°55'33.661"N y finaliza en 74°5'1.236"W, 4°55'22.694"N, con una longitud total de 2

km. En total, se dividió en 52 tramos de análisis, de acuerdo con los lineamientos del método PCI.

2.3. Procedimiento de inspección visual remota

La inspección visual se realizó utilizando imágenes obtenidas del plugin Google Street View y complementadas con imágenes satelitales de Google Earth. Se priorizó la selección de tramos cuya actualización fuera reciente y que ofrecieran una resolución adecuada para la identificación de daños.

Se reconoce que algunas fallas finas como fisuras, ahuellamientos leves o desprendimientos menores pueden no ser plenamente visibles en imágenes, lo que podría generar una subestimación de ciertos daños. No se realizó una verificación in situ, aunque se procuró verificar visualmente los puntos más críticos desde diferentes ángulos disponibles en las herramientas usadas. Esta limitación se reconoce como una fuente potencial de incertidumbre en el cálculo del PCI.

2.4. Cálculo del Índice de Condición del Pavimento (PCI)

El análisis de la condición del pavimento se realizó siguiendo la metodología establecida en la Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras del INVIAS (2002), que a su vez toma como base la norma ASTM D6433-20. Este método evalúa el estado del pavimento mediante una escala de 0 a 100, basada en el tipo, severidad y extensión de 19 tipos de fallas superficiales.

Se digitalizó el formato de exploración de condición en una plantilla Excel, como se observa en las Figuras 12 y 13 del documento, registrando para cada tramo el dimensiones del tramo, tipo de daño, severidad (leve, moderada o severa), área afectada, cálculo de densidad, valor deducido total (VDT), valor deducido corregido (VDC) y finalmente el PCI.

El total de tramos evaluados fue de 52, generando una clasificación por tramo según su PCI y una propuesta de intervención (mantenimiento rutinario, periódico, rehabilitación o

reconstrucción).

2.5. Consideraciones metodológicas adicionales

El tramo estudiado corresponde a una vía pavimentada con mezcla asfáltica (pavimento flexible). Las fallas fueron clasificadas de acuerdo con la nomenclatura y parámetros técnicos definidos por el INVIAS y la norma ASTM D6433, como base normativa de referencia.

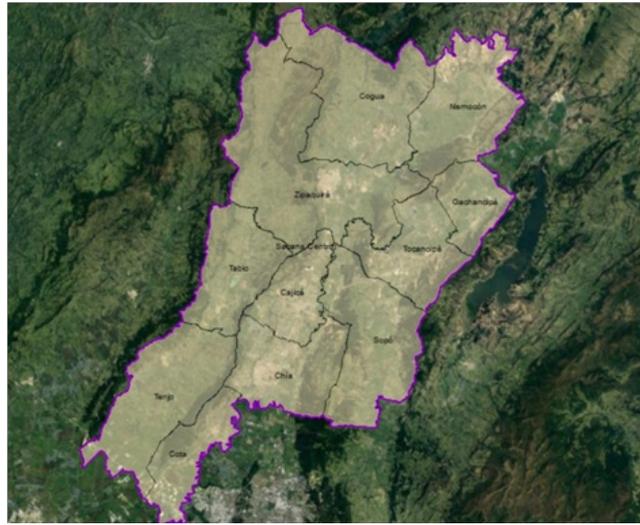
La inspección fue realizada por un equipo técnico entrenado en el uso de las herramientas SIG y conocedor de la metodología PCI. No se realizaron inspecciones de campo, por lo que los resultados dependen exclusivamente de las observaciones remotas. Esta elección responde a una condición de disponibilidad de recursos y se considera adecuada para estudios exploratorios o diagnósticos iniciales. No obstante, se recomienda validar in situ los puntos críticos en futuras investigaciones o cuando se decidan inversiones específicas.

3. Resultados

3.1. Selección vía de estudio por medio de aplicación de los SIG

La investigación empieza realizando la selección de un tramo de vía que se encuentre en la zona de la sabana centro del departamento de Cundinamarca – Colombia (Figura 2), escogiendo una vía que fuera importante para la región, la cual tuviera un tránsito concurrente y que además se pudieran identificar fallas en su pavimento.

Figura 2. Zona de estudio: Sector Sabana-Centro; Cundinamarca; Colombia



Fuente: Elaboración propia

Lo primero fue realizar la revisión de los datos geoespaciales en donde se puede ver qué información está presente en la zona de sabana Centro, filtramos dichas vías y realizamos una recolección de solo las vías que pertenecen a la delimitación política para la zona de sabana centro. Se revisaron los portales de INVIAS (ERMES), DANE y del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Colombia en Mapas).

En las Figuras 3, 4 y 5 se podrán observar las siguientes ilustraciones en donde se muestran las interfaces de los portales revisados en esta investigación:

Figura 3. Portal INVIAS

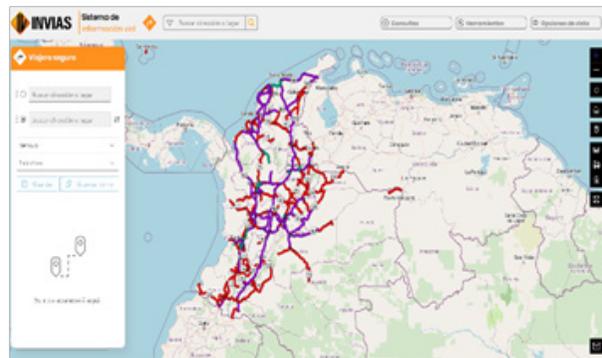


Figura 4. Portal Colombia en Mapas

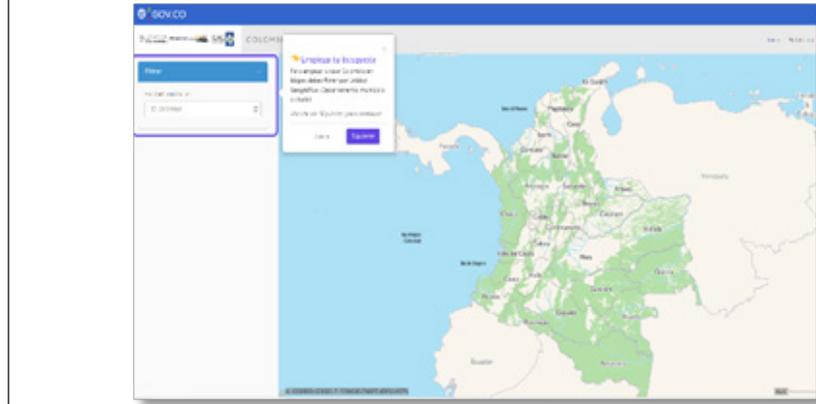
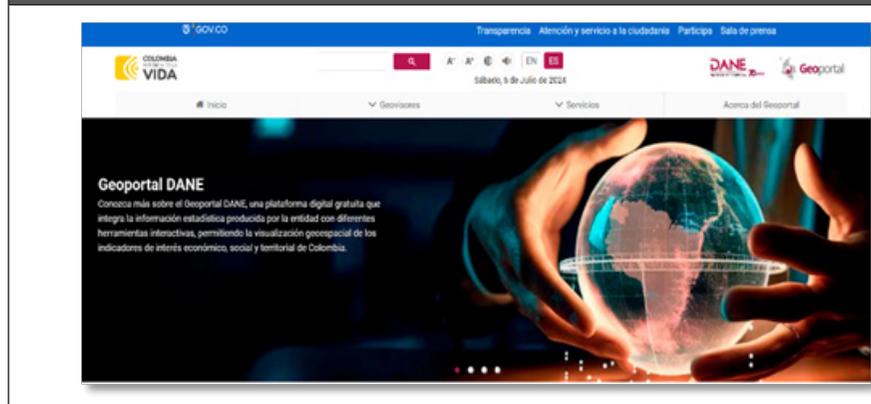
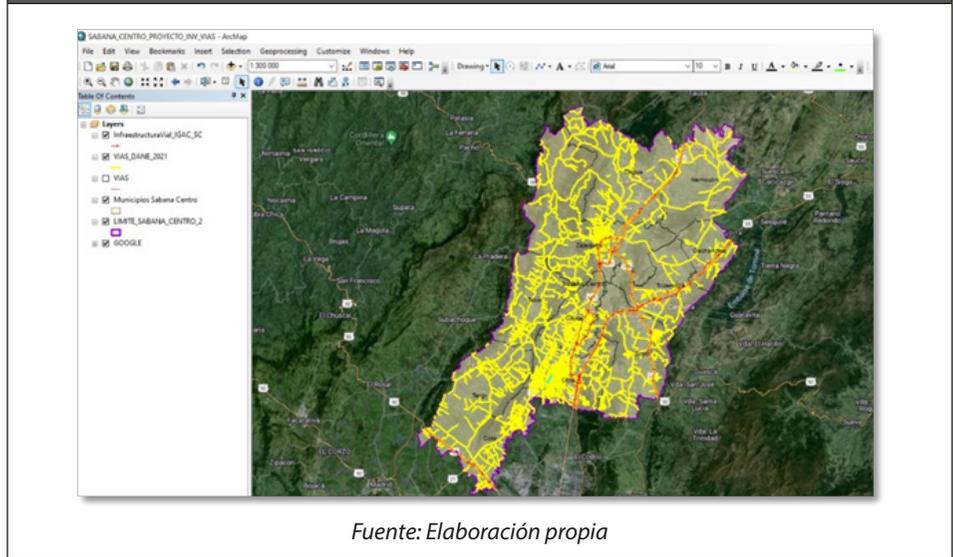


Figura 5. Portal DANE



En la Figura 6, se muestra la base de datos vectorial descargada del INVIAS y del DANE a través de un archivo tipo shape file tipo línea nos muestra lo siguiente: las líneas de color rojo se resaltan las vías de categoría Primaria que son información extraída de los datos del INVIAS y las líneas de color amarillo son las vías secundarias, terciarias y residenciales extraídas del DANE:

Figura 6. Interfaz del programa ArcMap con los datos vectoriales del INVIAS y DANE para la zona de sabana centro



Fuente: Elaboración propia

Revisando la información obtenida por parte del insumo vectorial tipo shape file descargado del INVIAS encontramos la siguiente tabla de atributos en donde encontramos 19 tramos de vía con sus respectivos atributos como lo son, categoría de la vía, código del tramo, código de la vía, nombre del tramo, sector y tipo de calzada como se muestra en la Figura 7:

Figura 7. Tabla de atributos vías extraída del shape file del INVIAS

id	Shape	key	cod_tramo	codipo_via	territorio	tramo	sector	administr	superficie	calzada
1	Polyline	Primer Orden	45A425	45A04	Cundinamarca	Troncal Central	Paseo Nacional por Zipaquirá	REVALS		Sanicla
2	Polyline	Primer Orden	50C430	50C403	Cundinamarca	Conexión Transversal Buenaventura - Puerto Carreño y Tr El Salitre - Sopó	ANE			Doble
3	Polyline	Primer Orden	45A411	45A04	Cundinamarca	Troncal Central	Paseo Nacional por Cajicá	REVALS		Sanicla
4	Polyline	Primer Orden	50C430	50C403	Cundinamarca	Conexión Transversal Buenaventura - Puerto Carreño y Tr Sopó - Cruce Ruta 55 (Bucefalo)	REVALS			Doble
5	Polyline	Primer Orden	45A426	45A426	Cundinamarca	Además a la Troncal Central	Variante Portachuelo - Casablanca	ANE	Pavimento	Sanicla
6	Polyline	Primer Orden	45A440	45A04	Cundinamarca	Troncal Central	Bogotá - Cajicá	ANE		Doble
7	Polyline	Primer Orden	45A426	45A426	Cundinamarca	Además a la Troncal Central	Variante Portachuelo	REVALS	Pavimento	Sanicla
8	Polyline	Primer Orden	55010	55042	Cundinamarca	Troncal Central del Norte	Variante Orquídea	ANE		Doble
9	Polyline	Primer Orden	55C430	55C403	Cundinamarca	Conexión Troncal Central del Norte con Troncal Central	Bogotá - Zipaquirá	CONC DEPT		Sanicla
10	Polyline	Primer Orden	45A426	45A426	Cundinamarca	Troncal Central	Variante Cajicá	ANE		Sanicla
11	Polyline	Primer Orden	55010	55011	Cundinamarca	Troncal Central del Norte	Tocancipá - Chisacaná	ANE		Doble
12	Polyline	Primer Orden	55010	55011	Cundinamarca	Troncal Central del Norte	Bogotá - Tocancipá	ANE		Pavimento
13	Polyline	Primer Orden	55010	55011	Cundinamarca	Troncal Central del Norte	Paseo Nacional por Tocancipá	REVALS		Doble
14	Polyline	Primer Orden	55C430	55C403	Cundinamarca	Troncal Central del Norte	Variante de Tocancipá	ANE		Sanicla
15	Polyline	Primer Orden	50064	5006	Cundinamarca	Transversal Medellín - Bogotá	Villeta - Bogotá	ANE		Doble
16	Polyline	Primer Orden	45A418	45A04	Cundinamarca	Troncal Central	Cajicá - Zipaquirá	ANE		Doble
17	Polyline	Primer Orden	45A426	45A04	Cundinamarca	Troncal Central	Zipaquirá - Ubaté	REVALS		Sanicla
18	Polyline	Primer Orden	45A426	45A426	Cundinamarca	Además a la Troncal Central	Variante Portachuelo - Casablanca	REVALS	Pavimentada	Sanicla
19	Polyline	Primer Orden	45A426	45A426	Cundinamarca	Además a la Troncal Central	Variante Portachuelo	ANE		Pavimento

Fuente: Elaboración propia

En la información geoespacial descargada del DANE encontramos la siguiente lista de vías y atributos que se mostrara en la siguiente

tabla donde evidencia que para la sabana centro según este insumo del DANE cuenta con 3680 vías en las cuales cuentan con varios tipos atributos como lo son, nombre del tramo, categoría de la vía, departamento y su longitud como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Tabla de atributos shape file vías DANE

DEPTO	CANTON	DEPTO_NOM	PAIS	PAIS_NOM	SHAPE_Length	RD_roads	csmc_id	nombre	ref	type	concrete	bridge	tunnel	measured	SHAPE_Len	Shape_Length
2005	11	12,960193	19651	347493702				Vía Voladores Fabio Rey		unclassified	0	0	0	0	0.07379	0.04124
2005	11	12,960193	102994	89036471				Vía Voladores Fabio Rey		unclassified	0	0	0	0	0.004335	0.004335
2005	11	12,960193	7920	23000391				Vía Tecnocida		unclassified	0	0	0	0	0.044880	0.005118
2005	11	12,960193	19612	34655500				Vía Tecnocida		secondary	0	0	0	0	0.015005	0.016005
2005	11	12,960193	19612	34657296				Vía Tecnocida	Cananda - Ponce	secondary	0	0	0	0	0.005492	0.005492
2005	11	12,960193	41850	65004495				Vía Tecnocida	Cananda - Ponce	unclassified	0	0	0	0	0.030860	0.030860
2005	11	12,960193	2652	25498271				Vía Temp		primary	0	0	0	0	0.12039	0.12039
2005	11	12,960193	188442	117688796				Vía Temp		secondary	0	0	0	0	0.003860	0.003860
2005	3	12,960193	3731280	7480	28885851			Vía Suba		secondary	0	1	0	0	0.00021	0.00021
2005	11	12,960193	7480	28885851				Vía Suba		secondary	0	1	0	0	0.000386	0.000386
2005	11	12,960193	7480	28885852				Vía Suba		secondary	0	0	0	0	0.000471	0.000471
2005	11	12,960193	199189	129077638				Vía Suba		secondary	1	0	0	0	0.002152	0.002152
2005	11	12,960193	199189	129077697				Vía Suba		secondary	0	0	0	0	0.002558	0.002558
2005	11	12,960193	199189	129077697				Vía Suba		secondary	1	0	0	0	0.002182	0.002182
2005	11	12,960193	262015	127498450				Vía Suba		secondary	0	0	0	0	0.002157	0.002157
2005	11	12,960193	19614	34657160				Vía Pionero sabana		unclassified	0	0	0	0	0.010690	0.010690
2005	11	12,960193	7920	230003159				Vía Pionero		unclassified	0	0	0	0	0.049981	0.037962
2005	11	12,960193	41992	86611475				Vía Parque de la Florida		tertiary	0	0	0	0	0.005027	0.005027
2005	11	12,960193	4412	25825706				Vía Hermita	Carretera 4	tertiary	0	0	0	0	0.002602	0.002602
2005	11	12,960193	7914	28887714				Vía Nueva		tertiary	0	0	0	0	0.124437	0.124437
2005	11	12,960193	158768	138831708				Vía Simón Bolívar		secondary_hwy	0	0	0	0	0.044363	0.044363
2005	11	12,960193	25208	39872570				Vía Las Margaritas		track	0	0	0	0	0.093402	0.048297
2005	11	12,960193	32090	43049904				Vía La Purita Tergo		secondary	0	0	0	0	0.039566	0.039566
2005	11	12,960193	32090	43077322				Vía La Purita Tergo		secondary	0	0	0	0	0.011358	0.006119
2005	11	12,960193	51189	174869569				Vía Guaymaral		unclassified	0	0	0	0	0.007096	0.007096
2005	11	12,960193	51189	174869570				Vía Guaymaral		secondary	0	1	0	0	0.000207	0.000149
2005	11	12,960193	256798	1277888123				Vía Cananda - Terminal		unclassified	0	0	0	0	0.040903	0.040903

Fuente: Elaboración propia

Después se realizó la unificación de estos insumos en una nueva base de datos tipo file en donde importamos y organizamos con los atributos que vemos más relevantes para esta investigación. Como resultado de esta unión que se realizó a través de las herramientas del programa ArcMap fue un archivo tipo shape file en donde se trató de unificar la mayor información posible de sus atributos, aquellos que se consideraron importantes y además que los dos archivos tuvieran, se dejaron atributos tales como: Departamento, nombre de la vía, categoría, calzada, material, código del tramo y de la vía y nombre del tramo o sector, cabe resaltar que no todas las vías tienen todos estos atributos nombrados (Figura 9).

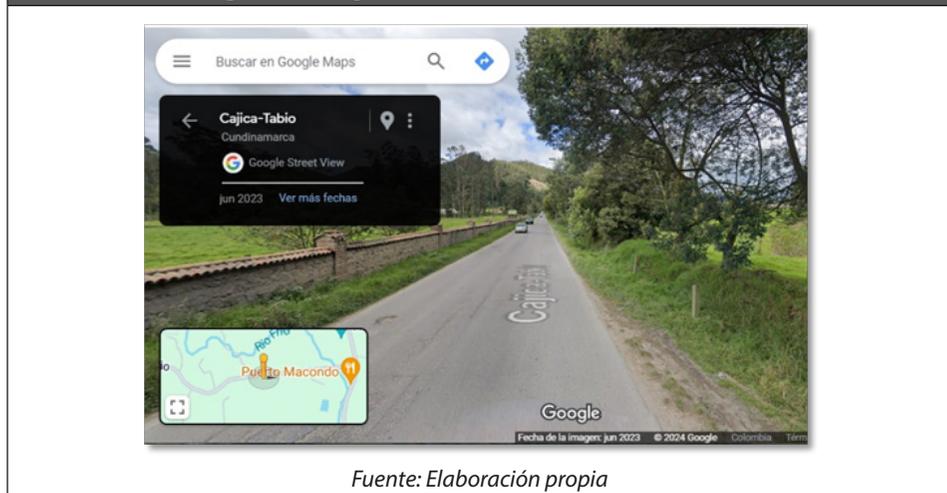
Figura 9. Tabla de atributos shape file con información unificada

OBJECTID	Shape	NPTO_CAMINO	name	tipo	Calzada	Material	cod_tramo	codigo_via	tramo	administra	Shape_Length	Length
3671	Polyline	CUNDINAMARCA	Carrera 20 R	residencial	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>			0,000332	
3672	Polyline	CUNDINAMARCA	Calle 9	residencial	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>			0,000752	
3673	Polyline	CUNDINAMARCA	Parque principal	footway	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>			0,000752	
3674	Polyline	CUNDINAMARCA	Carrera 8	residencial	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>			0,000767	
3675	Polyline	CUNDINAMARCA	Parque principal	footway	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>			0,000767	
3676	Polyline	CUNDINAMARCA	Calle 4	residencial	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>			0,000767	
3677	Polyline	CUNDINAMARCA	Parque principal	footway	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>			0,000711	
3678	Polyline	CUNDINAMARCA	Carrera 7	residencial	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>			0,000711	
3679	Polyline	CUNDINAMARCA		service	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>			0,000625	
3680	Polyline	CUNDINAMARCA		cycleway	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>			0,000625	
3681	Polyline	CUNDINAMARCA		Primer Orden	Sencilla	Pavimento	55CND030	55CND03			0,016942	
3682	Polyline	CUNDINAMARCA	El Salitre - Sogó	Primer Orden	Sencilla	Pavimento	55CND030	55CND03	Conexión Transversal Buenaventura - Puer	ANL	0,042963	
3683	Polyline	CUNDINAMARCA	Variante Portachuelo - Cas	Primer Orden	Sencilla	Pavimento	45A0400	45A040	Alternas a la Troncal Central	ANL	0,000934	
3684	Polyline	CUNDINAMARCA	Bogotá - Cajicá	Primer Orden	Doble	Pavimento	45A040	45A04	Troncal Central	ANL	0,211814	
3685	Polyline	CUNDINAMARCA	Variante Briceño	Primer Orden	Doble	Pavimento	55010	55CND	Troncal Central del Norte	ANL	0,043451	
3686	Polyline	CUNDINAMARCA	Variante Capatá	Primer Orden	Sencilla	Pavimento	45A0400	45A040	Troncal Central	ANL	0,11111	
3687	Polyline	CUNDINAMARCA	Tocancipá - Chocotá	Primer Orden	Doble	Pavimento	55010	5501	Troncal Central del Norte	ANL	0,165321	
3688	Polyline	CUNDINAMARCA	Bogotá - Tocancipá	Primer Orden	Doble	Pavimento	55010	5501	Troncal Central del Norte	ANL	0,323698	
3689	Polyline	CUNDINAMARCA	Variante de Tocancipá	Primer Orden	Sencilla	Pavimento	55CND03	55CND	Troncal Central del Norte	ANL	0,002177	
3690	Polyline	CUNDINAMARCA	Villeta - Bogotá	Primer Orden	Doble	Pavimento	500864	5008	Transversal Medellín - Bogotá	ANL	0,227596	
3691	Polyline	CUNDINAMARCA	Cajicá - Zipaquirá	Primer Orden	Doble	Pavimento	45A0416	45A04	Troncal Central	ANL	0,166976	
3700	Polyline	CUNDINAMARCA	Variante Portachuelo	Primer Orden	Sencilla	Pavimento	45A0428	45A04B	Alternas a la Troncal Central	ANL	0,006669	
3690	Polyline	CUNDINAMARCA	Briceño - Zipaquirá	Primer Orden	Sencilla	Pavimento	55CND019	55CND1	Conexión Troncal Central del Norte con Tro	CONC_DEPT	0,080428	
3692	Polyline	CUNDINAMARCA	Paseo Nacional por Zipaquirá	Primer Orden	Doble	Pavimento	45A0428	45A04	Troncal Central	RVVAS	0,035345	
3684	Polyline	CUNDINAMARCA	Paseo Nacional por Cajicá	Primer Orden	Doble	Pavimento	45A0411	45A04	Troncal Central	RVVAS	0,041025	
3685	Polyline	CUNDINAMARCA	Sogó - Cruce Ruta 55 (Brc)	Primer Orden	Sencilla	Pavimento	50CND0310	50CND03	Conexión Transversal Buenaventura - Puer	RVVAS	0,037349	
3688	Polyline	CUNDINAMARCA	Variante Portachuelo	Primer Orden	Sencilla	Pavimento	45A0428	45A04B	Alternas a la Troncal Central	RVVAS	0,013209	
3684	Polyline	CUNDINAMARCA	Paseo Nacional Por Tocancipá	Primer Orden	Doble	Pavimento	55010	5501	Troncal Central del Norte	RVVAS	0,039273	
3688	Polyline	CUNDINAMARCA	Zipaquirá - Ubaté	Primer Orden	Sencilla	Pavimento	45A0428	45A04	Troncal Central	RVVAS	0,211202	
3689	Polyline	CUNDINAMARCA	Variante Portachuelo - Cas	Primer Orden	Sencilla	Pavimento	45A0428	45A04B	Alternas a la Troncal Central	RVVAS	0,042877	

Fuente: Elaboración propia

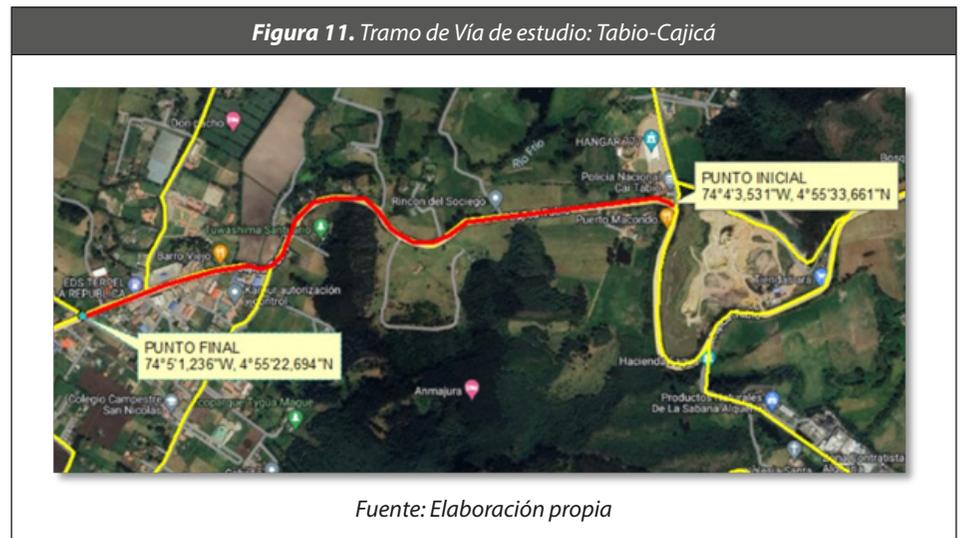
Teniendo esta información compilada en una GDB (Base de datos geográfica), se realizó una inspección del estado de esta malla vial con ayuda de un plugin instalado en el programa ArcMap llamado Street View el cual nos permitió observar el estado de las vías sin necesidad de ir a campo, además de las imágenes satelitales obtenidas del plugin de Google Earth. En la figura 10, se puede ver un ejemplo de imagen que nos muestra utilizando las dos herramientas anteriormente mencionadas, en donde se puede ver el estado actual de la vía dependiendo su última fecha de actualización con una resolución muy buena en donde se puede evidenciar el tipo de material de las vías, sus fallas y su longitud.

Figura 10. Imagen extraída de la herramienta Street View



Fuente: Elaboración propia

El tramo que se ha detectado como prioridad es el comprendido entre Tabio-Cajicá, Km0+000 y Km2+000 en el departamento de Cundinamarca, Colombia. Este tramo es de gran importancia debido a su alto tránsito y su papel en la conexión entre estos dos municipios. Cuenta con una longitud total de 2 km iniciado en el punto 1, tomando como referencia el Comando de Atención Inmediata (CAI) de la policía nacional de Tabio con las coordenadas Geográficas $74^{\circ}4'3,531''W$, $4^{\circ}55'33,661''N$ hasta el punto 52, tomando como referencia la entrada al Criadero las Islas con coordenadas geográficas $74^{\circ}5'1,236''W$, $4^{\circ}55'22,694''N$. En la figura 11, se muestra el tramo escogido con sus respectivas coordenadas:



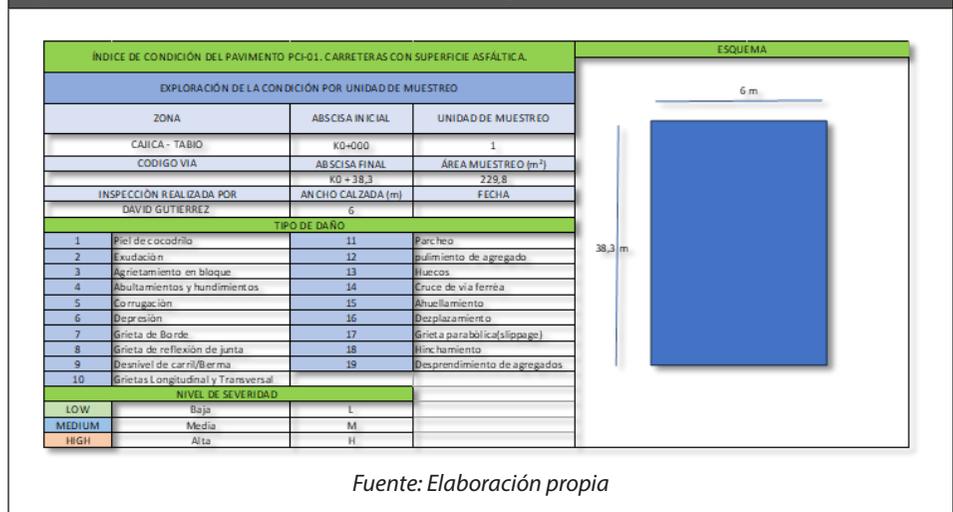
3.2. Cálculo del PCI

Una vez elegido el tramo, se efectuó el análisis del PCI siguiendo la guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras del Instituto Nacional de vías (INVIAS).

La metodología aplicada incluyó la realización de inspecciones visuales en el tramo de la vía, la clasificación de los defectos del pavimento y el cálculo del PCI para cada segmento, con un total de 52 tramos analizados mediante la captura de información obtenida de los SIG.

Se construyó una plantilla en Excel siguiendo los parámetros guiados por el manual para la inspección de la vía que permite digitalizar el Formato de exploración de condición para carreteras con superficie asfáltica, en donde en una primera parte se coloca el título de la plantilla, la zona de trabajo, su longitud y área de trabajo, persona que realiza la inspección los 19 tipos de daño según el manual, el nivel de severidad que se le dará a cada falla encontrado y un esquema del largo y ancho del tramo a inspeccionar como se ve en la Figura 12:

Figura 12. Formato de Condición del pavimento digitalizado a partir del formato del manual PCI



Fuente: Elaboración propia

En una segunda parte (Figura 13) se pone los tipos de fallas existentes en donde según el número correspondiente a la falla encontrada se pone en la segunda fila, debajo de estos se pone el área de afectación de la falla y el nivel de severidad. Al final se tomará el total de cada falla dependiendo también de su severidad ya que pueden ser la misma falla, pero no tener la misma severidad. Con ese total pasamos a calcular su densidad y el valor deducido esto siguiendo las indicaciones del manual ya que para los valores del VDT, q y VDC nos tenemos que guiar con gráficos para cada tipo de falla y ecuaciones establecidas. Obteniendo así el Valor del PCI para este tramo (Vázquez, 2002).

Figura 13. Formato de Condición del pavimento digitalizado a partir del formato del manual PCI

TIPOS DE FALLAS EXISTENTES														
Nº	10		1		7		11							
	Cant.	Seve.	Cant.	Seve.	Cant.	Seve.	Cant.	Seve.	Cant.	Seve.	Cant.	Seve.	Cant.	Seve.
1	2,5	H	18,3	L	13,8	M	0,2	M						
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
TOTAL (L)			18,3											
TOTAL (M)					13,8		0,2							
TOTAL (H)	2,5													
TIPO DEDAÑO	SEVERIDAD		TOTAL	DENSIDAD %	VALOR DEDUCIDO									
1	L		18,3	7,96	30							VD MAX: 100		
7	M		13,8	6,01	10							7,4286		
10	H		2,5	1,09	12									
11	M		0,2	0,1	3									
VALORES DEDUCIDOS										VDT	q	VDC	PCI	
1	30		12	10	3	55	7	22			63			
2	30		12	10	3	55	6	26						
3	30		12	10	3	55	5	29						
4	30		12	10	3	55	4	31						
5	30		12	10	2	54	3	34						
6	30		12	2	2	46	2	36						

Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos evidencian que el tramo evaluado presenta un estado general deficiente. Más del 75% de los sub-tramos (39 de 52) registran un PCI inferior a 40, lo que indica condiciones inaceptables que requieren intervenciones prioritarias de rehabilitación o reconstrucción. Esta tendencia refleja un claro rezago en las labores de mantenimiento vial en la región de Sabana Centro.

Se identificó que las fallas más frecuentes fueron el craquelado en bloque y los baches superficiales, lo que sugiere mecanismos de deterioro relacionados con la fatiga del pavimento y la infiltración de agua. Estos problemas podrían estar asociados a deficiencias en el sistema de drenaje, falta de mantenimiento periódico y posibles sobrecargas por tránsito pesado, especialmente en los sectores cercanos al municipio de Tabio, donde se observaron PCI más bajos en comparación con los tramos adyacentes a Cajicá.

4. Discusión

Después de realizar todas las 52 inspecciones en los 52 tramos obtenidos siguiendo los pasos del manual, en la Tabla 1, se muestran las fallas más encontradas en la inspección realizada, las imágenes que se verán a continuación fueron tomadas a través de la herramienta Street View en el tramo de vía Cajicá - Tabio:

Tabla 1. Fallas encontradas en la vía Cajicá – Tabio

PATOLOGÍAS ENCONTRADAS	IMÁGEN
Piel de Cocodrilo	
Grietas Longitudinal y Transversal	
Parcheo	
Huecos	
Grieta de Borde	
Meteorización	

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se realiza una clasificación PCI a los tramos de vías inspeccionados como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del PCI por tramos y clasificación

TRAMO	PCI	CLASIFICACIÓN	ACTIVIDAD
1	63	Bueno	Mantenimiento Periódico
2	21	Muy Malo	Reconstrucción
3	0	Sin fallas	
4	40	Malo	Rehabilitación
5	73	Muy Bueno	Mantenimiento Periódico
6	26	Malo	Rehabilitación
7	16	Muy Malo	Reconstrucción
8	41	Regular	Rehabilitación
9	16	Muy Malo	Reconstrucción
10	13	Muy Malo	Reconstrucción
11	48	Regular	Rehabilitación
12	33	Malo	Rehabilitación
13	35	Malo	Rehabilitación
14	27	Malo	Rehabilitación
15	23	Muy Malo	Reconstrucción
16	22	Muy Malo	Reconstrucción
17	46	Regular	Rehabilitación
18	28	Malo	Rehabilitación
19	24	Muy Malo	Reconstrucción
20	32	Malo	Rehabilitación
21	50	Regular	Rehabilitación
22	28	Malo	Rehabilitación
23	20	Muy Malo	Reconstrucción
24	45	Regular	Rehabilitación
25	32	Malo	Rehabilitación
26	36	Malo	Rehabilitación
27	37	Malo	Rehabilitación
28	21	Muy Malo	Reconstrucción
29	16	Muy Malo	Reconstrucción
30	22	Muy Malo	Reconstrucción
31	36	Malo	Rehabilitación
32	20	Muy Malo	Reconstrucción
33	20	Muy Malo	Reconstrucción
34	38	Malo	Rehabilitación
35	18	Muy Malo	Reconstrucción
36	31	Malo	Rehabilitación
37	22	Muy Malo	Reconstrucción
38	5	Fallado	Reconstrucción
39	40	Malo	Rehabilitación
40	34	Malo	Rehabilitación
41	14	Muy Malo	Reconstrucción
42	17	Muy Malo	Reconstrucción
43	23	Muy Malo	Reconstrucción
44	34	Malo	Rehabilitación
45	19	Muy Malo	Reconstrucción
46	26	Malo	Rehabilitación
47	0	Sin fallas	
48	46	Regular	Rehabilitación
49	90	Excelente	Mantenimiento Rutinario
50	42	Regular	Rehabilitación
51	34	Malo	Rehabilitación
52	30	Malo	Rehabilitación

Fuente: Elaboración propia

Observando la tabla vemos que dos resultados sin fallas en sus tramos tuvieron un valor de cero, un tramo con clasificación excelente y su actividad mantenimiento rutinario, un tramo con clasificación muy bueno y su actividad mantenimiento periódico, un tramo con clasificación regular y su actividad rehabilitación, veinte tramos con clasificación malo y su actividad rehabilitación, diecinueve tramos con clasificación muy malo y su actividad reconstrucción y un tramo con clasificación de fallado con su actividad de reconstrucción.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, en la Figura 14, observamos la tabla de atributos que se ha obtenido como resultado final al ingresar los datos obtenidos en la inspección a nuestra base de datos y cargados al programa ArcMap. Podemos observar en la tabla un total de 52 tramos en los cuales nos muestra su PCI obtenido, su clasificación por categorías mostradas, actividad a realizar de mantenimiento y la longitud de muestras.

Figura 14. Resultado de PCI por tramo en tabla de atributos

OBJECTID*	SHAPE*	TRAMO	PCI	CLASIFICACIÓN	ACTIVIDAD	SHAPE L
12	Polyline	1	63	Bueno	Mantenimiento Periódico	38,3
13	Polyline	2	21	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
14	Polyline	3	0	Sin fallas	N/A	38,3
15	Polyline	4	40	Malo	Rehabilitación	38,3
16	Polyline	5	73	Muy Bueno	Mantenimiento Periódico	38,3
17	Polyline	6	26	Malo	Rehabilitación	38,3
18	Polyline	7	16	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
19	Polyline	8	41	Regular	Rehabilitación	38,3
21	Polyline	9	16	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
22	Polyline	10	13	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
23	Polyline	11	48	Regular	Rehabilitación	38,3
24	Polyline	12	33	Malo	Rehabilitación	38,3
25	Polyline	13	35	Malo	Rehabilitación	38,3
26	Polyline	14	27	Malo	Rehabilitación	38,3
27	Polyline	15	23	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
28	Polyline	16	22	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
60	Polyline	17	46	Regular	Rehabilitación	38,3
62	Polyline	18	28	Malo	Rehabilitación	38,3
64	Polyline	19	24	Muy Malo	Reconstrucción	38,4
66	Polyline	20	32	Malo	Rehabilitación	38,3
67	Polyline	21	50	Regular	Rehabilitación	38,3
68	Polyline	22	28	Malo	Rehabilitación	38,3
70	Polyline	23	20	Muy Malo	Reconstrucción	38,4
72	Polyline	24	45	Regular	Rehabilitación	38,3
74	Polyline	25	32	Malo	Rehabilitación	38,3
76	Polyline	26	36	Malo	Rehabilitación	38,3
78	Polyline	27	37	Malo	Rehabilitación	38,3
79	Polyline	28	21	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
80	Polyline	29	16	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
81	Polyline	30	22	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
85	Polyline	31	36	Malo	Rehabilitación	38,3
88	Polyline	32	20	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
90	Polyline	33	20	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
91	Polyline	34	38	Malo	Rehabilitación	38,3
92	Polyline	35	18	Muy Malo	Reconstrucción	38,3
93	Polyline	36	31	Malo	Rehabilitación	38,4

Fuente: Elaboración propia

Como resultado final del estudio realizado, se deja en la Figura 15, la salida grafica obtenida a partir del procesamiento de datos de nuestra base de datos en donde podemos ver de una forma amigable y fácil de comprender el estado del tramo de la vía con su PCI.



La distribución de los valores de PCI evidenció una condición crítica: el 75% de los tramos se encuentra por debajo del umbral de 40, lo cual indica una situación de deterioro severo. Esta cifra supera ampliamente el porcentaje que se considera aceptable para una vía funcional, según la clasificación de la norma ASTM D6433, en la cual los valores menores a 40 representan pavimentos que requieren reconstrucción o rehabilitación inmediata.

La utilidad de la representación espacial de estos datos mediante el SIG fue notable. La Figura 15 permitió visualizar de forma inmediata la ubicación de los tramos más deteriorados, facilitando la priorización de intervenciones. Este enfoque geográfico, tal como lo sugieren Palma et al. (2023) y Al-Neami et al. (2018), mejora la gestión de recursos viales al permitir un análisis territorial del deterioro.

En comparación con otros estudios, como el de Orrego (2022) en Lima, Perú, donde se obtuvo un PCI promedio de 31.76, los hallazgos de este trabajo son similares, lo que indica que el deterioro de la malla vial es una problemática recurrente en zonas urbanas latinoamericanas con deficiente mantenimiento. Asimismo, en el estudio de Al-Neami et al. (2018) sobre la ciudad de Al-Kut, Irak, se concluyó que más del 60% de las vías requerían rehabilitación, reforzando la validez de emplear PCI + SIG como herramienta combinada para diagnóstico vial en contextos urbanos medianos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada, dado que este producto es resultado del proyecto de investigación financiado con código INV-DIS-3935.

6. Conclusiones

El desarrollo de un inventario vial georreferenciado es un instrumento esencial para la administración y organización eficaz de la infraestructura vial en la Sabana de Bogotá. Al disponer de un mapa exacto de la red de vías, se simplifica el acceso a información reciente que posibilita la toma de decisiones basadas en información auténtica acerca del estado y particularidades de estas.

Las herramientas SIG, como ArcMap y Google Earth, facilitan el manejo y visualización eficaz de grandes volúmenes de datos geoespaciales. Esto no solo simplifica la gestión de la información, sino que también maximiza el tiempo y los recursos destinados a la organización de obras y mantenimiento de carreteras, previniendo repeticiones de esfuerzos o fallos originados por la ausencia de datos.

Un inventario vial fundamentado en herramientas SIG posee la capacidad de actualizarse de forma constante, garantizando así que los datos sean flexibles y representen las condiciones reales en todo momento. Adicionalmente, el procedimiento empleado para la generación de este inventario puede ser replicado en otras áreas, ofreciendo una solución escalable para la administración de vías.

El inventario generado no solo será un recurso útil para la administración vial actual, sino que también se utilizará como fundamento para futuras investigaciones que intenten valorar la condición de las carreteras, el efecto del tráfico o la planificación de nuevas infraestructuras en la zona. Este paso inicial es crucial para el desarrollo de bases de datos georreferenciadas más sofisticadas en el futuro.

El estudio realizado en el tramo Cajicá-Tabio (K0+000 a K2+000) permitió evaluar el estado del pavimento mediante la aplicación del Índice de Condición del Pavimento (PCI) y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados mostraron una condición heterogénea en los 52 tramos analizados, con clasificaciones que variaron desde “Excelente” hasta “Fallado”. Se identificó que la mayoría de los tramos requieren intervenciones urgentes, ya que el 37% de ellos (19 tramos) presentaron una clasificación de “Muy Malo” y necesitan reconstrucción, mientras que el 38% (20 tramos) fueron clasificados como “Malo” y requieren rehabilitación. Solo un tramo obtuvo una clasificación “Excelente” y otro “Muy Bueno”, lo que indica que estas secciones están en buenas condiciones y solo necesitan mantenimiento rutinario o periódico.

La metodología aplicada, basada en inspecciones visuales apoyadas por herramientas como Street View y ArcMap, demostró ser efectiva para la recolección y análisis de datos geoespaciales. La integración de los resultados en una base de datos geográfica permitió visualizar de manera clara y eficiente el estado del pavimento, facilitando la identificación de áreas prioritarias para intervenciones. La salida gráfica generada (Figura 15) proporciona una representación intuitiva del estado de la vía, lo que resulta útil para la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento vial.

Los resultados evidencian la necesidad de implementar un plan de mantenimiento y rehabilitación integral en el tramo estudiado, priorizando los sectores con mayores daños. La aplicación de SIG y el PCI no solo optimiza el uso de recursos públicos, sino que también contribuye a mejorar la seguridad y calidad de la infraestructura vial en la región de Sabana Centro. Este enfoque metodológico puede replicarse en otras zonas para fortalecer la gestión vial en Colombia.

Como línea de continuidad, se propone replicar esta metodología en otros corredores viales de la región Sabana Centro para establecer comparaciones y caracterizar zonas críticas a mayor escala. Asimismo, se sugiere integrar datos de tránsito vehicular y características estructurales de las vías con el objetivo de correlacionar el PCI con las cargas de tráfico. Adicionalmente, se recomienda explorar el uso de imágenes capturadas mediante drones (UAV) y técnicas de aprendizaje automático (Han et al., 2023) para automatizar la detección de fallas y facilitar actualizaciones periódicas del estado de las vías de forma más rápida y precisa.

Referencias

- Al-Neami, M.; Al-Rubaei, R.; Kareem, Z. (2018). Assessment of Al-Amarah Street within the Al-Kut City using pavement condition index (PCI) and GIS technique. *Building and Construction Engineering Department, University of Technology, Baghdad, Iraq*. (Informe técnico)
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2019). *Pavement management systems: Best practices for maintenance and rehabilitation*. <https://www.asce.org>
- Crommelinck, S.; Bennett, R.; Gerke, M.; Nex, F.; Yang, M. Y.; Vosselman, G. (2016). Review of automatic feature extraction from high-resolution optical sensor data for UAV-based cadastral mapping. *Remote Sensing*, 8(8), 689. <https://doi.org/10.3390/rs8080689>
- Espejo, L. A.; García, J. (2018). Geographic Information Systems (GIS) in pavement management: A review of applications and benefits. *Journal of Infrastructure Systems*, 24(3), 04018012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000423](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000423)
- Flintsch, G. W.; Bryant, J. W. (2012). Pavement management applications using geographic information systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1816(1), 63–72. <https://doi.org/10.3141/1816-08>
- García-Guadarrama, J. (2007). *Informe de ingeniería ambiental*. México: División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Hafel, R.; Marsaoly, N.; Rauf, I. (2017). Identifikasi dan analisis tingkat kerusakan jalan berbasis spasial ruas Jalan Tobelo–Podiwang. *Seminario Nasional Teknik Sipil, Universitas Khairun*. (Referencia incompleta; se recomienda confirmar fuente o eliminar)

- Han, S.; Chung, I.-H.; Jiang, Y.; Uwakweh, B. (2023). PCler: Pavement condition evaluation using aerial imagery and deep learning. *Geographies*, 3(1), 132–142. <https://doi.org/10.3390/geographies3010008>
- Hanák, T.; Marović, I.; Pavlović, S. (2014). Identificación preliminar de indicadores de evaluación del entorno residencial para la modelización sostenible de áreas urbanas. *International Journal of Engineering Modeling*, 27, 61–68.
- Isradi, M.; Prasetijo, J.; Aden, T. S.; Rifai, A. I. (2023). Relationship of present serviceability index for flexible and rigid pavement in urban road damage assessment using pavement condition index and international roughness index. *E3S Web of Conferences*, 429, 03012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342903012>
- Isradi, M.; Prasetijo, J.; Rifai, A. I.; Aden, T. S.; Amin, M. (2022). Comparison of pavement performance models for urban road damage. *Proceedings of the 6th International Conference on Infrastructure and Civil Engineering (ICEC 2022)*. (Fuente estimada; confirmar si es correcto o ampliar)
- Iturbe-Argüelles, M. del R. (1997). *Transporte y dispersión de compuestos químicos orgánicos a través del flujo en medios porosos* (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.unam.edu.mx>
- Jajac, N.; Marović, I.; Hanák, T. (2015). Apoyo a la toma de decisiones para la gestión de proyectos de transporte urbano. *Građevinar*, 67(2), 131–141.
- Jiale, L.; Tao, L.; Xuefei, W. (2022). Automated asphalt pavement damage rate detection based on optimized GA-CNN. *Construction and Building Materials*, 343, 127968. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127968>
- Longley, P. A.; Goodchild, M. F.; Maguire, D. J.; Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems* (4th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118676957>
- Mamani Sánchez, B. C.; Sifuentes Quiñones, H. M. (2021). Análisis comparativo entre el método PCI y VIZIR para la evaluación superficial del pavimento flexible, tramo Ticapampa – Recuay – Ancash, 2021 (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5156>
- Miller, J. S.; Bellinger, W. Y. (2014). *Distress identification manual for the Long-Term Pavement Performance Program* (5th ed.). Federal Highway Administration (FHWA).
- Moradi, M.; Assaf, G. J. (2023). Diseño y construcción de un sistema inteligente de gestión de pavimentos para redes viales urbanas. *Sustainability*, 15(2), 1157. <https://doi.org/10.3390/su15021157>
- Ospina Ovalle, G. (2016). El papel de las vías secundarias y los caminos vecinales en el desarrollo de Colombia. *Revista de Ingeniería*, 1(44), 20–27. <https://doi.org/10.16924/revinge.44.3>

- Orrego, L. M. (2022). Propuesta de gestión de pavimentos mediante la integración del Sistema de Información Geográfica (SIG) y el Índice de Condición del Pavimento (PCI) para lograr la conservación de la Av. Marañón, Los Olivos, Lima – 2022 (Tesis de licenciatura). Universidad Privada del Norte, Lima, Perú. <https://hdl.handle.net/11537/31594>
- Palma Pin, Á. T.; Mogrovejo Carrasco, D. E.; Abreu Hernández, D. O. (2023). Sistema de gestión de pavimentos basado en el empleo de un sistema de información geográfica. *Revista Ciencia y Construcción*, 4(2), 38–52. <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/169>
- Shahin, M. Y. (2005). *Pavement management for airports, roads, and parking lots* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4889-9>
- Silvay Gualdrón. (2017). *Sistema de gestión de pavimentos flexibles basado en sistema de información geográfica* (Tesis de pregrado). Universidad de Boyacá. (Sugerido; confirmar fuente exacta)
- Tomlinson, R. F. (2013). *Thinking about GIS: Geographic information system planning for managers* (5th ed.). Esri Press. <https://doi.org/10.17128/9781589483484>
- Vázquez, R. (2002). *Pavement Condition Index (PCI)*. Manual técnico, Instituto Nacional de Vías (INVIAS), Colombia. (Sugerido; confirmar si se refiere a la guía de rehabilitación de pavimentos INVÍAS)
- World Bank. (2020). *Roads and the quality of life: The role of transport infrastructure in economic development*. <https://www.worldbank.org>
- Zapata Duque, J. A.; Cardona Londoño, G. J. (2012). Aplicación de los sistemas de información geográfica para la gestión de la malla vial de la ciudad de Medellín. *Ingenierías USBMed*, 3(2), 70–84. <https://doi.org/10.21500/20275846.277>