

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

**EVALUACIÓN DEL USO DE SENSORES REMOTOS EN LA IDENTIFICACIÓN DE
PATOLOGIAS SUPERFICIALES EN EL PAVIMENTO**



MARTÍN FLÓREZ MESA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ, D.C.
2021**

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

**EVALUACIÓN DEL USO DE SENSORES REMOTOS EN LA IDENTIFICACIÓN DE
PATOLOGÍAS SUPERFICIALES EN EL PAVIMENTO**



MARTÍN FLÓREZ MESA

Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Infraestructura Vial

Director:

I.C. Jessica María Ramírez Cuello, MSc.

Codirector;

I.C. Jaime Alberto Duarte Castro

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ, D.C.
2021**

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

Nota de aceptación:

Firma presidente del jurado

Firma el jurado

Firma el jurado

DEDICATORIA

A mis Padres por darme la vida, por sus enseñanzas y por el ejemplo de rectitud que han sido para mí. A mi esposa y a mis hijos que estuvieron acompañándome en este proceso y me han brindado todo su apoyo. A mis hermanas y sobrinos para los cuales he querido ser un guía mostrando el rumbo a seguir.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

AGRADECIMIENTOS

A la ingeniera Jessica Ramírez y al Ingeniero Jaime Duarte, por su orientación y apoyo durante esta investigación como directora y codirector.

A la Universal Santo Tomás por brindar el espacio y oportunidad de profundizar en mi formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
3. JUSTIFICACIÓN	16
4. OBJETIVOS	17
4.1 OBJETIVO GENERAL:	17
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	17
5. ALCANCE	18
6. ESTADO DEL ARTE	19
6.1 INCIDENCIA DEL DETERIORO DE PAVIMENTOS EN LA GESTIÓN VIAL.....	19
6.2 INVENTARIO DE PATOLOGÍAS EN PAVIMENTOS	22
6.3 USO DE SENSORES REMOTOS EN INVENTARIO DE PATOLOGÍAS DE PAVIMENTOS.....	24
7. MARCO TEÓRICO	34
7.1 DEFINICIONES:.....	34
7.2 ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI – Pavement Condition Index)....	36
7.2.1 Procedimiento de evaluación de la condición del pavimento	36
7.2.2 Unidades de Muestreo	37
7.2.3 Determinación de las Unidades de Muestreo para Evaluación	38
7.2.4 Selección de las Unidades de Muestreo para Inspección.....	39
7.2.5 Selección de Unidades de Muestreo Adicionales	39
7.2.6 Evaluación de la Condición	40
7.2.7 Cálculo del PCI de las unidades de muestreo	40
7.2.8 Cálculo del PCI de una sección de pavimento.	42
7.2.9 Manual de patologías	43
7.3 ÍNDICE DE DETERIORO SUPERFICIAL (IS) METODOLIGIA VIZIR	47
7.3.1 Procesamiento y presentación de la información.....	51
7.3.2 Cálculo del Índice de Deterioro Superficial “Is”	52

7.4	MARCO LEGAL	54
7.4.1	Clasificación de las operaciones con drones.....	54
7.4.2	Limitaciones de operación de drones según su clase	55
7.4.3	Otros aspectos reglamentados según la clasificación	56
8.	METODOLOGÍA, PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS	58
8.1	RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	58
8.2	IDENTIFICACIÓN DEL TRAMO PILOTO	58
8.2.1	Características generales de la vía Siberia - Tenjo	59
8.3	ALISTAMIENTO DE EQUIPOS:.....	60
8.4	TRABAJO DE CAMPO	61
8.4.1	Levantamiento de patologías de pavimento mediante inspección visual	62
8.4.2	Levantamiento de información con VANT DJI Phantom 4:	62
8.5	TRABAJO DE OFICINA	63
8.5.1	Procesamiento de imágenes tomadas con el VANT	63
8.5.2	Inventario de patologías del pavimento, utilizando las imágenes tomadas mediante el VANT DJI Phantom.....	64
8.5.3	Cálculo del índice de condición del pavimento por metodología PCI a partir de inventario de patologías realizado mediante inspección visual en sitio	64
8.5.4	Cálculo del índice de condición de deterioro superficial (IS), por metodología VIZIR a partir del inventario de patologías realizado mediante inspección visual en sitio	65
8.5.5	Cálculo del índice de condición del pavimento por metodología PCI (Pavement Condition Index) a partir de inventario de patologías realizado mediante imágenes georreferenciadas tomadas con el VANT	65
8.5.6	Cálculo del índice de condición de deterioro superficial (IS), por metodología VIZIR a partir del inventario de patologías realizado sobre imágenes georreferenciadas tomadas con el VANT	65
8.6	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
8.5.7	Comparación y análisis PCI	66
8.5.8	Comparación y análisis VIZIR	72

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

9.	CONCLUSIONES.....	78
10.	RECOMENDACIONES	79
11.	BIBLIOGRAFÍA	80
12.	ANEXOS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1. Deterioro de la vía y costos de intervención (periódica/rehabilitación).	19
Figura 6.2. Curva de deterioro del pavimento.	21
Figura 6.3. Costos de mantenimiento preventivo, rehabilitación y reconstrucción del pavimento, modelo USA. (Salomón 2006)	21
Figura 6.4. Costos relativos de mantenimiento preventivo, rehabilitación y reconstrucción del pavimento, modelo australiano.....	22
Figura 6.5. Diagrama de flujo procesamiento de imágenes.	26
Figura 6.6. VANT EBee de ala fija.....	27
Figura 7.1: Formato para las registro y cálculo del índice de deterioro superficial Is	53
Figura 7.2. Restricciones y requisitos de vuelo para Drones.....	57
Figura 8.1. Etapas del proyecto.....	58
Figura 8.2. Localización tramo piloto para el estudio	59
Figura 8.3. VANT DJI Phantom 4.	60
Figura 8.4: Comparación PCI obtenido en cada unidad de muestreo.	67
Figura 8.5: Cantidad de unidades de muestreo en cada condición de pavimento	68
Figura 8.6: Peso por patología, según su severidad en la afectación total, metodología PCI.....	70
Figura 8.7: Peso por patologías en la afectación total, sumando los tipos de severidad PCI.....	71
Figura 8.8: Comparación IS final metodología VIZIR	73
Figura 8.9: Comparación IS final metodología VIZIR	74
Figura 8.10: Comparación Índice de Deformación ID, metodología VIZIR.....	74
Figura 8.11: Comparación de áreas afectadas, metodología VIZIR.....	75
Figura 8.12: Comparación de peso de cada patología en las áreas afectadas, metodología VIZIR	76

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de la red vial de Colombia	13
Tabla 2. Estado de la red vial secundaria con pavimento	13
Tabla 3. Tipos de intervención por km/calzada para un pavimento.....	20
Tabla 4. Resultados GSD y número de fotos	29
Tabla 5. Resultados comparación medidas sobre imágenes vs medidas en campo	30
Tabla 6. Resultados comparación de Patologías PCI vs Vizir.....	31
Tabla 7. Rangos de calificación del PCI	36
Tabla 8. Formato de inspección de pavimentos asfálticos	37
Tabla 9. Longitudes de unidades de muestreo asfálticas.....	38
Tabla 10. Formato para las iteraciones del cálculo del CDV de inspección de pavimentos asfálticos.	42
Tabla 11. Descripción de patologías y niveles de severidad PCI.	43
Tabla 12. Patologías del Tipo A	47
Tabla 13. Patologías del Tipo B	48
Tabla 14 Niveles de gravedad de las patologías del Tipo A.....	49
Tabla 15. Niveles de gravedad de las patologías del Tipo B.....	50
Tabla 16. Agrupación del Is en categorías como variable cualitativa (Condición del pavimento según el inventario).....	52
Tabla 17. Características VANT DJI Phantom 4	61
Tabla 18. Unidades de muestreo PCI	62
Tabla 19. Comparación PCI	66
Tabla 20. Cantidad de unidades de muestro se acuerdo a la condición del pavimento	68
Tabla 21. Comparación afectación por tipo de patologías y severidad	69
Tabla 22. Comparación afectación por tipo de patologías totales	71
Tabla 23. Comparación IS Método Vizir.....	72
Tabla 24. Peso de cada patología de acuerdo con el área afectada, metodología VIZIR	75

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es evaluar el uso de sensores remotos (Vehículo Aéreo No Tripulado - VANT - DJI Phantom 4), en la identificación de patologías superficiales de pavimento. Para esto se tomó un tramo vial de prueba de 1 (un) km de longitud, localizado en la vía Siberia – Tenjo en el occidente de la Sabana de Bogotá.

Específicamente se pretende determinar la condición de deterioro del pavimento en el tramo vial del estudio, mediante imágenes tomadas con un VANT DJI Phantom 4. Igualmente determinará la condición de deterioro del pavimento en el tramo vial del estudio, mediante el procedimiento convencional de inspección visual in situ. La comparación y análisis de los resultados obtenidos por los dos procedimientos nos dará una visión clara sobre el uso de la tecnología de sensores remotos en este campo de la ingeniería civil.

Para cumplir los objetivos planteados, el levantamiento o registro de patologías superficiales del pavimento, se realizó por dos procedimientos, a saber: Uno en equipo de cómputo, sobre imágenes georreferenciadas tomadas con el VANT y para tener una referencia de comparación también se realizó el registro de patologías por medio de inspección visual in situ.

Para la evaluación de las patologías superficiales del pavimento, se utilizó las metodologías Vizir y PCI, en los dos procedimientos que se registraron las patologías.

Como resultado se obtuvo el índice de deterioro del pavimento por las metodologías Vizir y PCI, para las patologías registradas sobre las imágenes tomadas con el VANT y para las patologías registradas por medio de inspección visual in situ.

Los resultados obtenidos en el cálculo del Índice de Condición del pavimento (metodología PCI) y del Índice de Deterioro Superficial IS (metodología VIZIR), muestran una similitud en los dos procedimientos.

La investigación arrojó resultados favorables para la implementación como método alternativo del uso de Drones o VANT, con el fin de tomar imágenes georreferenciadas de alta resolución y utilizarlas para registrar las patologías del pavimento en un tramo vial. Con esto se evidencia que los resultados esperados de la investigación y descritos en el anteproyecto son positivos.

Palabras clave: imágenes georreferenciadas, índice de condición del pavimento (PCI), índice de condición de deterioro superficial (IS), pavimento, VANT, Vizir.

1. INTRODUCCIÓN

Con el acelerado desarrollo que avanza la tecnología en todos los campos del conocimiento, los ingenieros que trabajan enfocados en el área de la infraestructura vial, acceden a procedimientos más eficientes y controlables, en la obtención de información primaria de eventos y/o problemas de ingeniería que requieren fuentes de datos altamente confiables, para plantear y desarrollar las mejores soluciones desde diferentes puntos de vista.

Una de las disciplinas que en las últimas décadas ha tenido grandes avances es la geomática, lo que ha facilitado el uso de sensores remotos en campos del conocimiento como la cartografía, la agronomía, la ecología, la meteorología, estudios ambientales, la industria militar, entre otros. Igualmente son importantes los avances de la fotogrametría en el procesamiento y manejo de imágenes obtenidas con sensores remotos. Este tipo de tecnologías también se puede aplicar en la Ingeniería Civil, como alternativa para obtener información rápida y confiable que nos lleve a resultados más favorable y exitosos al momento de presentar soluciones a diversas problemáticas que existen.

Por lo anterior, se plantea un proyecto de investigación que profundice en el uso de los sensores remotos, en particular el VANT (vehículo aéreo no tripulado) del modelo DJI Phantom 4, para el levantamiento de información de campo correspondiente a patologías superficiales de pavimentos en infraestructura vial, con el fin de obtener su estado de deterioro en un tramo de vía que se tendrá como piloto, utilizando metodologías como Vizir y PCI, ampliando el campo de posibilidades como solución alternativa y confiable a bajo costo para ser usado en estudios de pavimentos y gestión vial.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo de la infraestructura vial en nuestro país, ha crecido en las últimas décadas a través de la modalidad de concesiones, principalmente en las vías de primer orden. Estas vías se mantienen en buen estado debido a que, en los contratos de concesión se establece un sistema de calificación y aceptación basado en un índice de estado, para mantener la vía en buenas condiciones de servicio, (Yepes T, et al. (2013), lo que ha beneficiado a los usuarios que las transitan.

Por el contrario, a las vías secundarias y terciarias que están a cargo de la nación, los departamentos y municipios, conforman una red que presenta un estado crítico y paulatinamente ha venido deteriorándose por la falta de mantenimiento debido a los bajos recursos que disponen los departamentos y la nación para inversión en infraestructura vial, (Zamora Fandiño y Barrera Reyes, 2012).

En la tabla 1 se observa la distribución actual de la red vial del país, que de acuerdo con Bolívar y Quintero (2019), tiene una longitud de 215.988 km aproximadamente:

Tabla 1. Distribución de la red vial de Colombia

Tipo de vía	% del total	longitud (km)
Vías Primaria	8%	17.382
Vías Secundarias	21%	44.399
Vías terciaras	71%	154.207

Nota : Bolívar y Quintero, 2019

La red vial secundaria esta pavimentada en un 36% de su longitud y tiene gran importancia en la conectividad nacional, dado que comunican los municipios con las capitales departamentales y a su vez permiten conectar con las vías de primer orden.

En la tabla 2 se observa el estado del pavimento de la red vial secundaria

Tabla 2. Estado de la red vial secundaria con pavimento

Bueno	Regular	Malo
46%	20%	20%

Nota: Bolívar y Quintero, 2019

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

Para preservar esta valiosa infraestructura, se requiere una adecuada gestión vial, basada en inventarios detallados con el fin de identificar y evaluar las patologías superficiales que indiquen el estado de deterioro de su pavimento y con esto planificar adecuada y oportunamente los mantenimientos preventivos que se requieran.

El deterioro temprano de los pavimentos nuevos y los que han tenido intervenciones de rehabilitación, se relaciona con proyectos mal implementados que en muchas ocasiones son desarrollados sin un adecuado levantamiento las patologías que muestre su estado actual y anticipe intervenciones oportunas, (Cardoso Parente et al. 2017, como citó Vieira et al. 2017)).

El levantamiento de las patologías del pavimento, es una labor que convencionalmente la realiza un ingeniero especialista, por medio de inspección visual a lo largo del tramo vial en estudio. Al respecto se debe tener en cuenta entre otras consideraciones, el tiempo en la toma de información que se estima en un promedio de 500 m día (Cruz Toribio y Gutiérrez Lazares, 2019), dado que se hace caminando, metro a metro en cada tramo de calle o carretera que se esté evaluando, con el consecuente esfuerzo físico y la exposición a riesgos de seguridad vial que esto implica.

Otro aspecto importante a considerar del levantamiento mediante auscultación visual, es que la información tomada en campo, requiere de análisis estadísticos para determinar si las mediciones son consistentes o si existe necesidad de modificar las calificaciones dadas.

En un estudio realizado por el Ministerio de Transporte de Ontario en Canadá, varias fuentes de variación e inconsistencia fueron identificadas. Se observó que la variabilidad entre los evaluadores fue alta con ciertos tipos de patologías (Attoh-Okine & Adarkwa, 2013). Sin embargo, existe tecnología para reducir estas inconsistencias, a través de dispositivos con sistemas automatizados, dotados de cámaras especiales acondicionadas en vehículos y software para procesamiento de imágenes, que eliminan la subjetividad, dado que en oficina se puede verificar la información levantada en campo.

No obstante, es una tecnología costosa, como es el caso del sistema *Spider* que identifica y georreferencia las patologías del pavimento y requiere una inversión de aproximadamente de 1.510.000 dólares (Tu Equipo SAS, 2020); o del sistema *MFV de Dynatest*, que realiza la identificación de patologías de manera automática y tiene un costo de 1.221.090 dólares (Dynatest Colombia S.A.S., 2020)

Dado que las vías secundarias como ya se mencionó, no cuentan con presupuesto suficiente para su mantenimiento, la implementación de sistemas automatizados en el inventario de patologías superficiales del pavimento, no es muy atractiva por su alto costo y en consecuencia se recurre al método convencional de inspección visual en campo, recorriendo la vía paso a paso. Debido a esto, surge la necesidad de buscar y adoptar

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

métodos alternativos que, con bajo costo, puedan realizar el inventario de patologías superficiales del pavimento, obteniendo información rápida y permitiendo realizar una evaluación objetiva del estado de la vía. Igualmente es importante tener una base histórica del estado de deterioro de las vías, para realizar análisis multitemporal y calibrar curvas de deterioro de los pavimentos, datos que serán de gran utilidad para la gestión vial.

Las consecuencias de no adoptar un método adecuado que se ajuste al presupuesto, tiempo de entrega y que garanticen la calidad de la información levantada, hará que no exista un seguimiento, diagnóstico y evaluación, aumentando el deterioro de las vías progresivamente, perdiendo su vida útil de diseño y con esto incrementando todos los costos generados por una intervención mayor, como es una rehabilitación o una reconstrucción (Vargas Buitrago, 2018)

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se plantea como alternativa para el levantamiento de patologías superficiales del pavimento, el uso de un VANT DJI Phantom, dotado de cámaras especiales, que toman imágenes de alta resolución y sobre estas se identifican, cuantifican, dimensionan y analizan de manera precisa y confiable las diferentes afectaciones superficiales que tiene el pavimento de un tramo vial de prueba, incluyendo su respectiva georreferenciación.

3. JUSTIFICACIÓN

La infraestructura vial es uno de los bienes más importantes que tiene un país, por tanto, una adecuada gestión de conservación con mantenimientos periódicos y rutinarios a través del tiempo, tiene especial importancia para que su condición permanezca en buen estado.

Estudios sobre el deterioro de las vías, muestran que el mantenimiento oportuno ahorra costos futuros de intervenciones mayores como pueden ser rehabilitación o reconstrucción total de la infraestructura; además de mantener las condiciones de servicio adecuadas que inciden en la seguridad de los usuarios, así como en los costos de operación vehicular y la calidad del medio ambiente, (*Association mondiale de la Route*, 2014).

Los costos de realizar una actividad de rehabilitación, en comparación a los de realizar una de mantenimiento periódico pueden ser hasta un 1500% mayores (Cámara de Comercio de Bogotá, Universidad de Los Andes, 2019). Por esto, es indispensable realizar intervenciones preventivas, que deben estar planteadas de acuerdo con un plan de gestión de la infraestructura, con acciones a corto, mediano y largo plazo. El Banco Mundial en un informe sobre gestión comercial y financiera de carreteras (Heggie & Vickers, 1998), indica que en América Latina y el Caribe los costos anuales adicionales debidos a una insuficiente conservación vial, ascienden a 1.200 millones de euros.

En las vías pavimentadas, el deterioro de las condiciones funcionales y estructurales, incrementa los costos de operación vehicular para los usuarios, debido al mayor consumo de combustibles, neumáticos, repuestos, desgaste del vehículo, mayor duración de los tiempos de viaje y por accidentes de tránsito. Igualmente, los costos de las intervenciones de reparación, rehabilitación y/o reconstrucción de las vías también son mayores a los de un mantenimiento rutinario y periódico, efectuado oportunamente. Por esto, es recomendable que los planes de intervenciones estén basados en el análisis del deterioro de los pavimentos (capas de rodadura) y permitan asignar recursos para mantenimiento y conservación rutinaria de vías en buen estado, así como el monitoreo de las mismas para la identificación temprana de amenazas. Esto con el objetivo de impedir que las vías lleguen a un estado en el que sean necesarias intervenciones más costosas (CONPES 3857, 2016).

Los avances tecnológicos en la geomática y la fotogrametría, permiten que a bajo costo se puedan adoptar alternativas para el levantamiento e identificación de los deterioros superficiales de los pavimentos, por medio de sensores remotos tipo VANT, en particular con el Dron DJI Phantom 4, cuyo costo está en 7.139.000 COP (TIENDAS ALKOSTO, 2020)

De acuerdo con lo anterior, se justifica profundizar en la utilización de esta tecnología en la gestión vial y ejecución de estudios confiables de pavimentos a bajo costo.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL:

Evaluar el uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales del pavimento.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar la condición de deterioro del pavimento en un tramo vial de prueba, mediante imágenes tomadas con un VANT DJI Phantom 4.
- Hallar la condición de deterioro del pavimento en el tramo vial del estudio, mediante el procedimiento convencional de inspección visual in situ.
- Comparar los resultados obtenidos de la condición de deterioro del pavimento, mediante el procedimiento convencional de inspección visual in situ y utilizando imágenes tomadas con un VANT DJI Phantom 4.

5. ALCANCE

De acuerdo con el planteamiento del problema y los objetivos propuestos, esta investigación se desarrollará bajo el siguiente alcance:

- Definir un tramo vial piloto, no menor a 1 kilómetro de longitud, donde se hará el desarrollo de la investigación. Este tramo vial deberá tener superficie de rodadura en pavimento con deterioros visibles.
- Se realizará una misión de vuelo con un VANT DJI Phantom 4, para tomar imágenes de alta resolución en el tramo vial piloto definido. En equipo de cómputo y mediante software fotogramétrico especializado, se hará en oficina el procesamiento de las imágenes tomadas en campo y se generará un ortomosaico georreferenciado en formato TIF, ECW o compatible.
- Con ayuda del software Civil3D, se hará la identificación, medición y evaluación de las patologías del pavimento observados en las imágenes del ortofotomosaico generado del tramo vial piloto.
- Se realizará el levantamiento de patología del pavimento en el tramo vial piloto, mediante el procedimiento convención de inspección visual in situ. Para esta actividad se usarán los formatos establecidos en las metodologías PCI y Vizir, en los que se registrarán las patologías identificadas sobre la superficie del pavimento.
- Se obtendrá el índice de deterioro del pavimento del tramo vial piloto, mediante las metodologías Vizir y PCI, con la información obtenida de las imágenes tomadas con el VANT DJI Phantom 4.
- Se obtendrá el índice de deterioro del pavimento del tramo vial piloto, mediante las metodologías Vizir y PCI, con la información obtenida de la inspección visual hecha in situ.
- Se realizará un análisis comparativo de los resultados obtenidos por los dos procedimientos, con el fin de evaluar el uso del VANT DJI Phantom 4 en la auscultación de pavimentos.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, se presentarán las conclusiones del trabajo desarrollado y se darán las recomendaciones respectivas para futuras investigaciones sobre el tema.

6. ESTADO DEL ARTE

6.1 INCIDENCIA DEL DETERIORO DE PAVIMENTOS EN LA GESTIÓN VIAL

Sobre el deterioro de los pavimentos y su incidencia en la gestión de recursos para mantener en buenas condiciones de servicio las vías y preservarlas a través del tiempo, se han realizado estudios por entidades públicas y privadas en diferentes partes del mundo, dado los altos costos que representa para un país construir o rehabilitar infraestructura vial y la importancia que ésta tiene para su desarrollo económico.

En un estudio del Banco Mundial (1988) sobre el deterioro de los caminos en los países en desarrollo, se indica que la falta de mantenimiento de los caminos equivale a una desinversión, pues significa desperdiciar inversiones anteriores. El informe precisa que, en los últimos veinte años anteriores al informe, en 85 países en desarrollo examinados en el estudio, se había perdido estructura vial por un valor de 45.000 millones de dólares, debido a mantenimiento insuficiente. Esta pérdida se podría haber evitado mediante un adecuado mantenimiento preventivo que habría costado menos de 12.000 millones de dólares.

EL documento CONPES 3272 (2004), presenta costos de mantenimiento vial en Colombia, donde se indica el impacto económico que representa una mala gestión. El proceso de deterioro de las vías se parametrizó en una función que se graficó con información de la red vial pavimentada no concesionada, en términos de tráfico, pluviometría, terreno y capacidad estructural promedio, tal como se muestra en la figura 6.1.

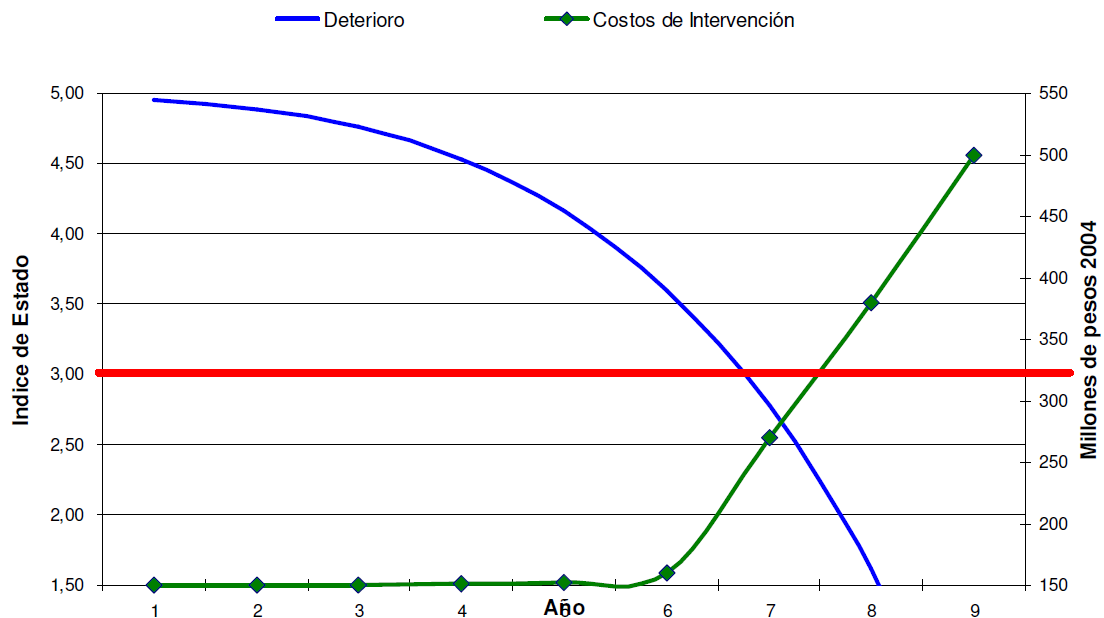


Figura 6.1. Deterioro de la vía y costos de intervención (periódica/rehabilitación). (CONPES 3272, 2004)

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

Este deterioro acelerado, conlleva a su vez a elevar significativamente dos tipos de costos. El primero es el costo de intervención que se triplica cuando no es suficiente un mantenimiento periódico que cuesta en promedio \$150 millones/km cada seis años, sino una rehabilitación que implica intervención de la base y probablemente la sub-base, la cual puede tener un costo promedio de \$500 millones/km. El segundo son los costos de operación de los vehículos que se multiplican en función inversa al índice de estado de la vía. Se ha demostrado que el costo de un mantenimiento bien programado es muy inferior a los ahorros en operación que captura el sector privado por transitar en vías en buen estado de servicio.

Para el caso de la red pavimentada en Colombia, el costo por km/calzada de las intervenciones, se presenta en la tabla 3:

Tabla 3. Tipos de intervención por km/calzada para un pavimento

Tipo de Intervención	Descripción	Costo km (COP 2004)
Mantenimiento periódico	Reposición de la capa de pavimento sin reparar la estructura (base/sub-base). Se realiza la intervención, que es en promedio cada 6 años.	150 millones
Rehabilitación Menor	En este caso además de la capa de pavimento es necesario reparar la estructura.	300 millones
Rehabilitación Mayor	Exige la reconstrucción total de la estructura.	500 millones

Nota: POLÍTICA INTEGRAL DE INFRAESTRUCTURA VIAL Documento CONPES, 2004

Salomón (2006), mediante análisis gráficos, presentó herramientas para plantear estrategias sobre el modelo de gestión vial en Estados Unidos. El informe incluye una gráfica detallada sobre deterioro de los pavimentos en función del tiempo y los efectos económicos de la intervención en mantenimiento oportuno. En otra gráfica se muestra los gastos relativos por km-carril del mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción del pavimento, en función del tiempo.

El pavimento se clasifica de acuerdo al grado y la severidad de los tipos de patologías actuales identificadas. La escala numérica es del 0 al 100, en la cual el 0 equivale a la peor condición y 100 a la mejor condición del pavimento. La figura 6.2 representa una curva típica de la tasa de deterioro del pavimento. Se observa que 40% de deterioro ocurre al 75% de vida útil del pavimento. Se sugiere que en este punto se debe tomar la decisión de

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

aplicar la acción preventiva, de no haberse hecho antes. Cada entidad gubernamental debe decidir cuándo activa el dispositivo de mantenimiento preventivo, diferir esta acción dará como resultado la necesidad de rehabilitar o reconstruir el pavimento y esto es mucho más costoso.

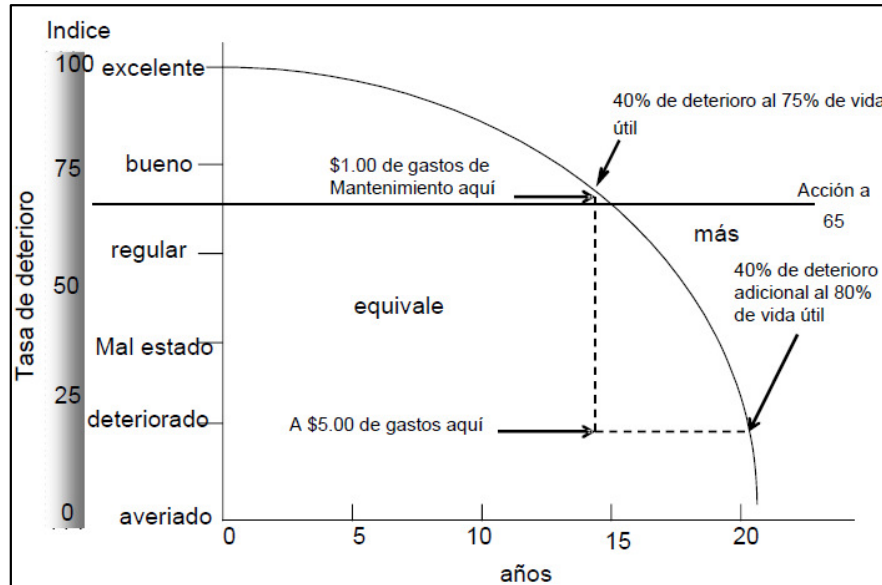


Figura 6.2. Curva de deterioro del pavimento.
(Salomón, 2006)

En la figura 6.3 se presentan los costos por kilómetro-carril de las diferentes intervenciones, en función de la curva de deterioro del pavimento

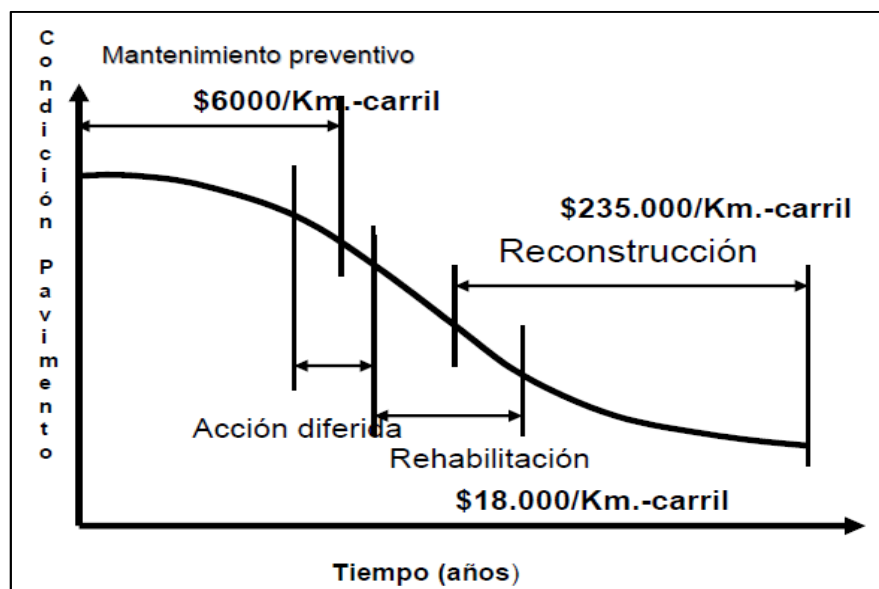


Figura 6.3. Costos de mantenimiento preventivo, rehabilitación y reconstrucción del pavimento, modelo USA. (Salomón 2006)

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

De acuerdo con lo anterior, un programa de conservación de carreteras debe incluir un análisis detallado de las patologías del pavimento, el cual se obtiene haciendo un adecuado inventario de patologías, que se realiza en un tiempo definido.

Kelly et al. (2016), presentan el análisis gráfico que se observa en la figura 6.4 y que corresponde al modelo australiano para la gestión de pavimentos. Igual que en los anteriores, se evidencia el impacto económico del mantenimiento oportuno del pavimento en función del tiempo, evitando que se llegue al fallo total de la estructura.

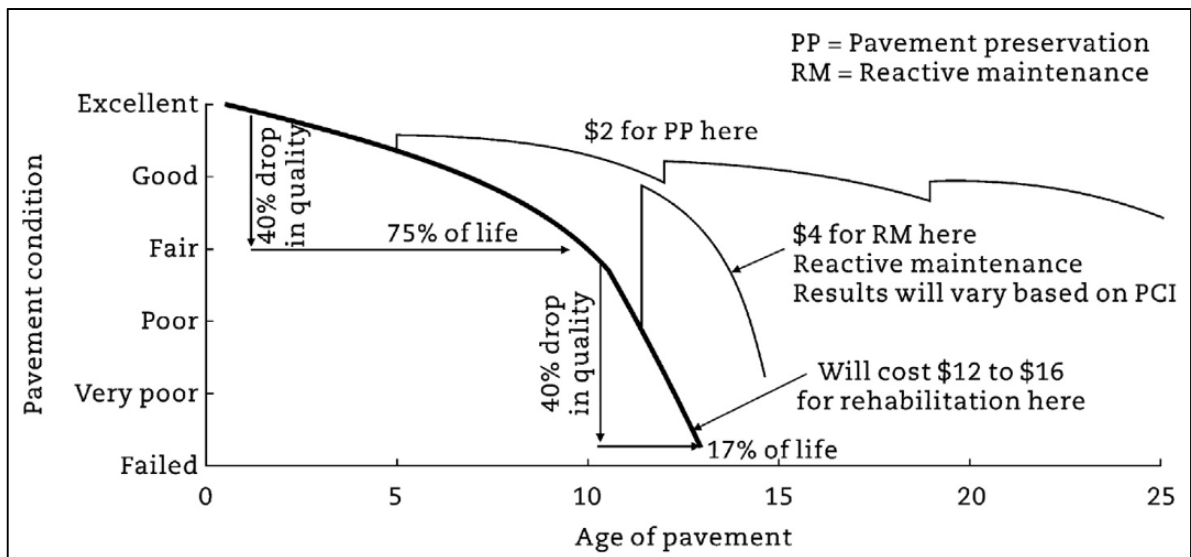


Figura 6.4. Costos relativos de mantenimiento preventivo, rehabilitación y reconstrucción del pavimento, modelo australiano.

(Kelly, Delaney, Chai y Mohamed, 2016)

6.2 INVENTARIO DE PATOLOGÍAS EN PAVIMENTOS

La evaluación del estado de las vías urbanas y las carreteras, es un aspecto importante por considerar en el análisis de los factores operacionales relacionados con la calidad y el nivel del servicio de su infraestructura. El estado de la infraestructura vial afecta los parámetros macroscópicos de volumen, velocidad y densidad considerados en el estudio del fenómeno del tránsito; esto indica que de acuerdo con las características geométricas de la vía, el estado del pavimento y las obras complementarias, los usuarios definirán sus preferencias a la hora de realizar cualquier desplazamiento, lo cual, a su vez, afectará el comportamiento de los flujos vehiculares y peatonales, las velocidades desarrolladas por los vehículos y sus costos de operación (Quintero, 2010).

La Guía Metodológica Para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras (INVIAS 2008), indica que el inventario de las patologías visibles, es

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

generalmente el primero de un conjunto de pasos necesarios para evaluar la condición global de un pavimento. Esta información es la que determina la localización y la extensión de las investigaciones posteriores, con el fin de establecer un juicio apropiado sobre la condición del pavimento que es objeto de la evaluación.

Para las actividades de gestión de pavimentos es muy importante establecer la extensión y severidad de las patologías existentes para determinar las estrategias o medidas correctivas que eliminen las causas que generaron la situación y formular una solución duradera y económica. El desarrollo e implementación de los sistemas de gestión de pavimentos en los últimos 20 años ha tenido un sustancial crecimiento, en especial en las áreas de identificación e inventario de patologías (Cruz y Palacios, 2012).

En Colombia se han adoptado las metodologías Vizir (LCPC, 1991) francesa, por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS y PCI (ASTM) de Estados Unidos por Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) de Bogotá, (Ríos Marín J. G. y Martínez Arias I. D., (2007), como herramientas de gestión vial para determinar el índice de estado de los pavimentos. Existen otras metodologías que se han desarrollado o adaptado en otros países, todas con el objetivo de valorar el deterioro los pavimentos mediante un índice de estado, que se usa como variable fundamental en el diseño de las soluciones de reparación que el mantenimiento exija. Igualmente, el índice de estado se usa dentro de la gestión vial para determinar y calibrar la curva de deterioro del pavimento en una red vial a través del tiempo, con el fin de anticipar las reparaciones necesarias junto con la respectiva planificación de recursos.

Attoh-Okine & Adarkwa (2013), describen las siguientes metodologías para determinar el índice de estado de pavimentos, desarrolladas por entidades de Estados Unidos:

- *Present Serviceability Rating (PSR)*: Es una calificación de servicio actual, desarrollado por la AASHO y se basa en la calidad de manejo según lo experimentado por un panel de observadores que viajan en un vehículo en una sección particular del pavimento.
- *The Condition Rating Survey (CRS)*: Es también otro sistema de calificación de condición estimado, utilizado por el Departamento de Transporte de Illinois (IDOT). La escala es una escala de 1.0-9.0 con incrementos de 0.1. Un valor de 1.0 representa una falla total, mientras que un valor de 9.0 representa un pavimento recién construido.
- *Pavement Surface Evaluation and Rating System (PASER)*: Evaluación y Calificación de la Superficie del Pavimento (PASER). Viene bajo los sistemas de calificación estimados, dado que también es una calificación visual de las condiciones del pavimento basada en una escala 1-10.
- *Present Serviceability Index (PSI)*: Es un índice de capacidad de servicio actual y tiene un rango de 0-5. Se considera como un sistema de clasificación medido, dado

que se basa en mediciones físicas de las características del pavimento además de las observaciones de evaluadores entrenados.

- *Distress Index (DI)*: Es el Índice de Deterioro y se considera como un sistema de calificación de condición medida. Este es utilizado por el Departamento de Transporte de Michigan (MDOT).
- *Overall Pavement Index (OPI)*: Algunas agencias también usan el Índice general de pavimento, que se basa en la clasificación de patología modificada (MDR). El MDR también se basa en el PSI que a su vez se deriva del IRI.
- *Pavement Quality Index (PQI)*: Es Índice de calidad del pavimento utilizado por el Departamento de Transporte de Minnesota (MNDOT) y es una combinación del PSR y el SR. Es la raíz cuadrada de PSR multiplicada por SR. Se extiende en una escala de 0.0 para pavimentos fallidos a 4.5 para ningún defecto.

Cerón Bermúdez, (2006) comparó los resultados obtenidos con metodologías Vizir y PCI sobre el estado de deterioro en el pavimento de un tramo de carretera con pavimento flexible, encontrando que la metodología Vizir presentó mayores facilidades para su aplicación, dado que establece una diferencia clara entre patologías estructurales y patologías funcionales. Un aspecto importante que plantea el autor es la subjetividad que se puede presentar en la toma de la información debido al criterio y experiencia del evaluador.

Sierra Díaz y Rivas Quintero, (2016) realizaron una comparación de los resultados obtenidos con metodologías Vizir y PCI sobre el estado de deterioro en el pavimento de un tramo vial urbano de la ciudad de Bogotá. Los autores afirman que para el mantenimiento de vías urbanas se recomienda el uso de la metodología francesa Vizir, debido a que esta es más fácil de entender y de llevar a cabo dado que califica las patologías estructurales tipo A como los más representativos para la evaluación de la condición del pavimento. No obstante, esta metodología es solo aplicada a las vías con pavimento flexible.

Para vías con pavimento rígido los autores recomiendan la aplicación de la metodología PCI, debido a que esta comprende todos los tipos de patologías, por tanto, es más detallada y compleja. Esto hace que sea más demorada su análisis y evaluación.

Por otro lado, Cardona y Prieto (2014), compararon las metodologías Vizir adoptada por el INVIAS y la metodología mexicana desarrollada por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). La investigación concluye que es posible adoptar la metodología SEDECOL para implementarla a nivel local, no obstante, es importante que sus resultados se complementen con los ensayos pertinentes de acuerdo con cada caso de estudio.

6.3 USO DE SENSORES REMOTOS EN INVENTARIO DE PATOLOGÍAS DE PAVIMENTOS

El uso de sensores remotos en la auscultación de pavimentos, se ha venido implementando conforme ha avanzado la tecnología en las disciplinas de Geomática y Fotogrametría y de

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

los sistemas computacionales en cuanto a capacidad de procesos y almacenamiento de datos. Igualmente, los trabajos de investigación al respecto, se han venido desarrollando en la misma medida.

A continuación, se describen investigaciones presentadas en artículos, tesis y conferencias sobre el tema, realizadas en diferentes partes del mundo:

Berrio y Ussa (2012), desarrollaron en el software Matlab, una aplicación que, mediante técnicas de análisis e interpretación de imágenes, puede identificar las fisuras y grietas en losas pavimentos rígidos. Las imágenes deben ser tomadas a una altura máxima de 1.7 m. de manera normal y oblicua a la superficie, por medio de una cámara con resolución superior a 3.1 MP. El método llega a una efectividad en la detección de fisuras y grietas hasta del 87%. Como trabajo futuro los autores sugieren ampliar la cantidad de tipos de patologías de pavimentos rígidos que el aplicativo puede detectar y adaptar el programa para poder analizar imágenes de pavimentos flexibles. Además, implementar un solo método de procesamiento capaz de brindar resultados de alta precisión y a la vez minimizar el tiempo de cómputo.

Tan y Li, (2019), Realizaron un trabajo de auscultación de pavimentos con un VANT DJI Phantom y utilizaron las imágenes tomadas en campo para generar un modelo topográfico 3D con precisión vertical de 1 cm, mediante un procesamiento fotogramétrico; además desarrollaron un algoritmo capaz de identificar patologías de pavimento en el modelo 3D. Los resultados del experimento mostraron que este método pudo identificar con precisión sobre el pavimento, patologías superficiales con un error de altura/profundidad en la detección que estuvo en el nivel del centímetro, lo que implica una perspectiva prometedora en la práctica de la ingeniería. El trabajo futuro de esta investigación se centrará en mejorar la precisión y eficiencia de este método implementando sistema de GPS más adecuado.

Cruz Toribio y Gutiérrez Lazares (2019) emplearon un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para la evaluación superficial de vías urbanas. La investigación se realizó sobre un estudio caso cuyo objetivo fue calcular el Índice de Condición del Pavimento (PCI) para un tramo de la Av. Separadora Industrial Cuadras 8-10, Ate, en Lima – Perú. El trabajo también se realizó con la metodología convencional de inspección visual. Los resultados obtenidos muestran valores cercanos de PCI entre la evaluación realizada sobre las imágenes tomadas con el VANT respecto a la evolución realizada con inspección visual. De este trabajo se concluye que la evaluación superficial de pavimentos, empleando imágenes georreferenciadas obtenidas de un VANT es conveniente para gestionar actividades de mantenimiento y/o rehabilitación de las vías urbanas optimizando los recursos de los gobiernos municipales. El uso del vehículo aéreo no tripulado permite el levantamiento de información en corto tiempo, sin interrumpir el tráfico ni poner en riesgo la vida de los inspectores en comparación con el método convencional. Se sugiere comprobar la

metodología en otras vías, que perfeccione el proceso y se ajuste a un algoritmo de interpretación de vistas georreferenciadas con el fin de automatizar todo el proceso.

Gopalakrishnan et al. (2017), realizaron un estudio cuyo objetivo fue desarrollar un modelo de detección de grietas simplificado sobre Imágenes tomadas con un UAV, para evaluar el estado de infraestructura civil, a través de un algoritmo de clasificación en imágenes de la base de datos ImageNet. Los resultados muestran que el método propuesto puede alcanzar rápida y fácilmente precisión de hasta 90% en la búsqueda de grietas en situaciones reales. Esta investigación propone profundizar en la disponibilidad pública de datos de imágenes UAV de infraestructura civil y desarrollar un módulo para recolectar y procesar imágenes UAV y así disponer de un conjunto de datos robusto para análisis predictivo. Igualmente se debe ampliar el algoritmo de clasificación para incluir la detección de patologías distintas a las grietas y tener más información para una la evaluación del estado de deterioro de la infraestructura.

La figura 6.5 muestra el diagrama de flujo del procesamiento de imágenes con el algoritmo desarrollado.

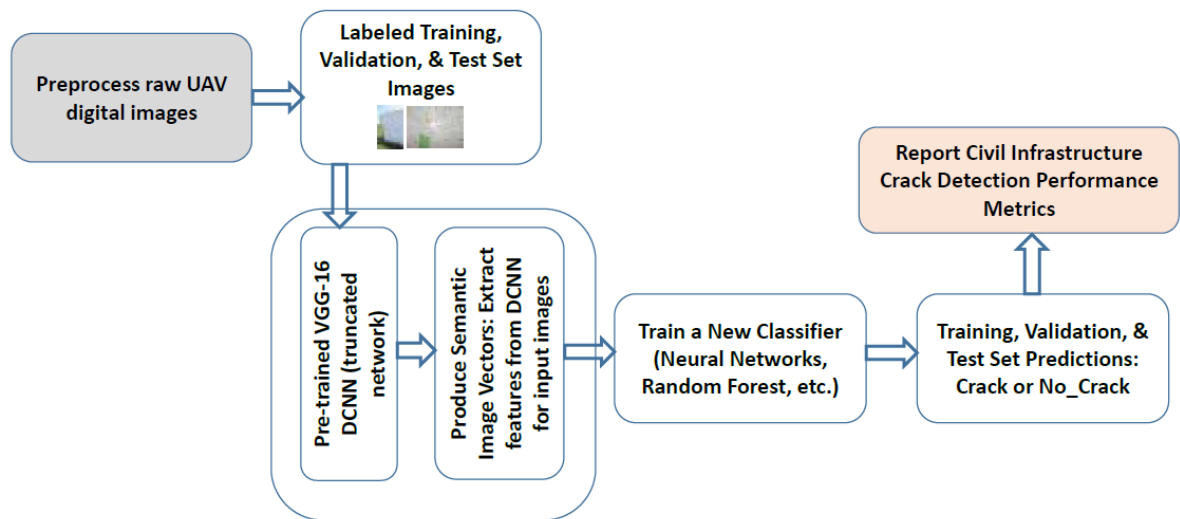


Figura 6.5. Diagrama de flujo procesamiento de imágenes.
(Gopalakrishnan, Gholami, Vidyadharan, Choudhary y Agrawal, 2016)

Cardoso et al. (2017), desarrollaron un procedimiento para identificar las manifestaciones patológicas superficiales en pavimento asfáltico de un tramo de 3,0 km de la vía estatal TO-050, en Palmas, Tocantins– Brasil. Como herramienta se utilizó un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), software para plan de vuelo y procesamiento de imágenes, mosaicos de ortofotos y Modelo Digital de Superficie (MDS) del área en estudio. Por medio de la interpretación visual de las imágenes generadas, fue posible identificar las manifestaciones patológicas con su variedad confrontando datos obtenidos con datos de inspección visual de campo. Aun cuando presenta un elevado potencial de reconocimiento de áreas

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

comprometidas, hay que destacar que la inestabilidad del vehículo interfiere considerablemente en la calidad de las imágenes generadas.

Para la recolección de las imágenes fue utilizado el vehículo aéreo modelo eBee que consta de una plataforma aérea con sensores específicos acoplados que permiten obtener imágenes fotográficas y videos. La aeronave trae incorporados los sensores que posibilitan la estabilidad del equipo en misión, tanto como la transmisión de datos que garantizan el acompañamiento directo de la ejecución del vuelo.

La figura 6.6 ilustra el modelo EBee utilizado para la toma de imágenes:



Figura 6.6. VANT EBee de ala fija.
(Cardoso, Carvalho y Pessoa, 2017)

Se utilizaron dos cámaras en la toma de las imágenes, que reúnen características adecuadas y compatibles con el sistema EBee y la aplicación de formación de ortofotomosaico, dos modelos S110 NIR y el S110 RGB, adaptadas de forma de ser controladas por el piloto automático de la aeronave. La cámara NIR adquiere datos en la banda del infrarrojo próximo y la cámara RGB obtiene datos de imagen en el espectro visible que consiste en la posibilidad de reproducir cualquier color, a partir de una mezcla de apenas tres colores primarios conjuntamente con la luz: azul, verde y roja.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

El análisis de las patologías en el trecho vial de la TO-050, fue realizado por medio de la fotointerpretación de los mosaicos, que versa distinguir e identificar elementos en la superficie terrestre, por medio de las respuestas espectrales de los dos sensores utilizados. Dentro de la variedad de patologías superficiales encontradas, se destacan patologías de borde, baches y hundimientos con soplado lateral.

En la evaluación visual de las imágenes obtenidas por los dos sensores, NIR y RGB, para la identificación de manifestación patológica obtenida por el sensor infrarrojo, se evidencia la necesidad de transferir detalles, para una correcta identificación de los defectos del pavimento. En contraparte las imágenes con asociación de las tres bandas de colores presentan mayor riqueza de informaciones, facilitando la identificación y la interpretación correcta de la falla.

En lo que se refiere al levantamiento de áreas comprometidas por patologías, se observó que existe una diferencia poco significativa en términos porcentuales entre los datos levantados por medio de los mosaicos generados y los levantados en campo.

La metodología se muestra, por tanto, prometedora, por presentar resultados rápidos, pudiendo ser utilizada como apoyo para identificación de defectos y medición cuantitativa de servicios de recuperación y mantenimiento del pavimento.

Vargas Buitrago (2017), realizó un análisis comparativo de dos metodologías de inspección visual para identificar y evaluar el deterioro de un kilómetro de pavimento flexible de la calle 7 en el municipio de Cajicá – Cundinamarca, por los métodos tradicional y de sensores remotos. La investigación incluyó determinación de costos actuales por cada método para la ejecución las actividades respectivas.

Para la investigación se utilizó un VANT DJI Phantom 3 con el cual pudo obtener una visión general y un registro de diferentes patologías en una misma imagen, sin embargo, al realizar la depuración de la información, la toma de las medidas es inexacta, debido a que es complicado en terreno mantener la altitud exacta del VANT para realizar el escalado de las imágenes. Esta toma de medidas se realiza mediante un software que permite a una escala aproximada, teniendo en cuenta la altura de 30 metros en la cual se tomaron más muestras y con ayuda de un puntero obtener un valor cercano al real en el terreno. Lo anterior es debido a que no se usó un software fotogramétrico para el procesamiento y georreferenciación de las imágenes y así poder tomar medidas precisas sobre las éstas, sin tener que recurrir a métodos de escalado.

La autora del trabajo concluye que, de acuerdo con la metodología utilizada en la investigación, el procedimiento tradicional de inspección visual ofrece mejores resultados para identificación de las patologías superficiales del pavimento, respecto el método alternativo de realizar el inventario de patologías sobre las imágenes tomadas con el VANT.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

Gómes Bezerra y Borba Pedroza (2019), realizaron un trabajo para evaluar la capacidad de un vehículo aéreo no tripulado (UAV), en el monitoreo de carreteras, identificando y midiendo las diferentes patologías de una carretera pavimentada. El área de estudio se encuentra en un tramo de 400 m de longitud de la ruta 319, que se encuentra en el municipio de Aragoiânia, a 30 km de Goiânia, capital del estado de Goiás – Brasil.

El mapeo se realizó con un VANT DJI Phantom 4 y contó con la ayuda de la aplicación Drone-Deploy que permite elaborar el plan de vuelo, teniendo una planificación previa de lo que sucederá en el campo. Este paso es extremadamente importante porque le permite definir la altura del dron y así conocer el tamaño del píxel que se generará. La prueba se llevó a cabo a dos alturas del VANT en relación con la superficie del pavimento, 60 m y 100 m. La distancia desde la aeronave hasta el suelo es la variable principal para definir la distancia de muestra del suelo (GSD), que significa (distancia de muestra del suelo) y representa el píxel de la imagen en el suelo en unidades de medida generalmente representadas en centímetros.

Los vuelos tuvieron lugar el 08/09/2019 de 11:20 am a 12:00 m, debido a que la incidencia del sol en ese momento está en un ángulo de 90°, por lo que no hay ningún tipo de sombra que dificulte el mapeo a través de drones.

En tabla 4 se muestran los resultados de los dos vuelos, respecto a GSD y número de fotos obtenidas:

Tabla 4. Resultados GSD y número de fotos

Altura de vuelo m	GSD x pixel cm	Duración minutos	No. de fotos
60	1.8	05:34	91
100	3	03:25	23

Nota: Gómes Bezerra y Borba Pedroza, 2019

Las patologías también se mapearon de manera convencional por inspección visual, con el propósito de verificar la efectividad del equipo en la identificación de las patologías de la vía. El procesamiento de las imágenes tomadas con el VANT se realizó con el software QGis.

En las imágenes aéreas, se observó un cambio del tono en el punto identificado como fisura y grietas en el campo. En la imagen de 60 metros, la visualización y por lo tanto la delimitación fue posible. Con la imagen de 100 m no fue posible una correcta identificación de todas las patologías.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

En la tabla 5 se muestran diferencias en las medidas de acuerdo con el método de obtención de la información:

Tabla 5. Resultados comparación medidas sobre imágenes vs medidas en campo

Patología	Cinta métrica	Drone a 69m	Drone a 100 m
Bache	0.70X0.85 m	0.71X0.67 m	0.65X0.65 m
	1.50X0.95 m	2.01X1.15 m	1.94X1.15 m
	0.74X0.55 m	0.53X0.69 m	0.53X0.63 m
Reparqueo	2.03 m ²	1.48 m ²	No visualizada
Fisuras	no tomado	Identificada	No visualizada

Nota: Gómes Bezerra y Borba Pedroza, 2019

Se verificaron pequeñas divergencias con las mediciones recogidas en campo con cinta métrica respecto a las medidas sobre las imágenes con las delimitadas con el Qgis, sin ser relevante en la evaluación de un camino pavimentado. Aunque las grietas y las fisuras son identificables en las imágenes aéreas, fueron las que tuvieron más incertidumbres en las comparaciones en puntos homólogos al terreno, especialmente en la imagen a 100 m de altura.

Cárdenas, Holguín y Zabala, (2019), realizaron una comparación en la auscultación de un pavimento flexible utilizando las metodologías Vizir y PCI, sobre imágenes tomadas con un VANT DJI Phantom 4. Esta investigación no contempló identificación de patologías superficiales directamente en campo con inspección visual, por tanto, no hay un umbral de comparación al respecto.

La evaluación de la condición del pavimento, se realizó en la carrera 69B sur entre la Avenida Primero de Mayo y Calle 9A Sur en Bogotá, en un tramo de 0.912 Km, que debe estar en óptimas condiciones para el proyecto a ejecutar por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU).

Los resultados de la investigación de patologías de acuerdo con las metodologías Vizir y PCI, se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados comparación de Patologías PCI vs Vizir

Patología	PCI	Vizir
Parcheo	14.32%	14.32%
Ahuellamiento	6.78%	6.78%
Desprendimiento de agregados	2.24%	0.57%
Piel de Cocodrilo		1.61%
Abultamientos y hundimientos		1.16%
Exudación		0.57%
Indicador	52	3
Calcificación	Regular	Regular

Nota: Cárdenas, Holguín y Zabala, 2019

No obstante, las diferencias en los niveles de clasificación entre el PCI (7) y Vizir (3), en general los resultados del índice de estado del pavimento fueron similares, con una clasificación de REGULAR. Los autores concluyen que se logró demostrar la utilidad de la tecnología en un campo de la ingeniería civil con el uso del VANT DJI Phantom 4 pro, en la auscultación visual del pavimento dentro del estudio realizado.

Herrera y Serna (2017), presentaron una propuesta metodológica para detectar baches y/o huecos de una vía terciaria urbana a partir de vuelos aéreos no tripulados (UAV), utilizando métodos GEOBIA y Lógica Difusa. La investigación se realizó en una vía local con pavimento flexible en el sector Gran América Bogotá. Para la toma de imágenes se utilizó un VANT DJI Phantom 4 con el cual se realizó la misión de vuelo a una altura entre de 80 a 100 m y en la hora del día entre 7 am y 11 am. Las imágenes se procesaron con el software PIX4D con el cual se obtuvo un ortofomosaico georreferenciado de la vía en estudio. Para la aplicación de los métodos de GEOBIA y Lógica Difusa se utilizaron los Software ArcGis y Ecognition.

Los resultados de la investigación muestran que, de acuerdo con los objetivos planteados, la metodología resulta eficiente en el análisis detallado de vías en áreas urbanas por la óptima detección de objetos y la segmentación de la vía como súper objeto permite tener una mayor precisión a la hora de la discriminación de varios objetos que se sobreponen en el área del estudio por razones de ángulo, volumen o área de ocupación. Para futuras investigaciones se deben incorporar más objetos que representen en el algoritmo de identificación los distintos tipos de patologías superficial de los pavimentos, para tener un espectro más amplio de patologías y generar toda la información requerida en metodologías como Vizir o PCI, para calcular el índice de estado del pavimento

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

Sánchez Morales et al. (2018), realizaron una investigación sobre un método alternativo para hallar el parámetro IRI (Índice de rugosidad internacional) en pavimentos flexibles, a partir de modelos 3D obtenidos mediante el procesamiento de imágenes tomadas con cámaras de alta resolución ubicadas sobre base trípode y base móvil y procesadas con el software fotogramétrico Agisoft PhotoScan.

Las pruebas se realizaron en tres tramos, cada uno pavimento flexible de 100 m de longitud. Dos de ellos se encuentran ubicados dentro del campus de la Universidad Tecnológica de la Habana–Cuba y el otro en la sección de la autopista este-oeste que transita frente a ésta. Se determinó el perfil longitudinal de cada tramo a partir de dos métodos: fotogramétrico y para tener parámetros de comparación también se realizó por el método el topográfico (mira-nivel). Las mediciones se realizaron en ambos casos cada 0.5 m. Se calcularon los valores de IRI en intervalos de 20 m obteniéndose cinco valores de IRI para cada perfil analizado.

Los resultados de las pruebas no fueron del todo satisfactorios en los tramos 1 y 2, dado que los indicadores de aceptación del IRI tomado con fotogrametría solamente fueron el 20% respecto a los del IRI tomado con topografía. En el tramo 3 se obtuvo un mejor resultado dado que se implementó un mejor equipamiento que permite controlar de mejor manera los parámetros de toma fotográfica.

Los autores de la investigación recomiendan perfeccionar el instrumental utilizado para la realización de los ensayos para aumentar la precisión de los resultados. Los procedimientos realizados ofrecen valores adicionales como la ortofotografía de alta resolución, generando la posibilidad de identificar patologías sobre el pavimento tales como piel de cocodrilo, exudación, grietas, ahuellamiento y baches.

Pucha y Zarate (2020) realizaron una investigación que explora un método alterno de evaluación superficial del pavimento de redes viales que consiste en automatizar la recolección, el procesamiento y el análisis del estado del pavimento utilizando un vehículo aéreo no tripulado (VANT). El objetivo era evaluar la condición superficial del pavimento rígido de un tramo de carretera, empleando ortoimágenes obtenidas mediante un VANT y la metodología del índice de condición del pavimento. La investigación corresponde al tipo de diseño no experimental cuantitativo y transversal. Se concluye que el uso de la técnica VANT es adecuada para detectar y medir patologías en la superficie de carreteras, porque se obtiene información detallada y precisa de su condición.

Grandsaert (2015), Realizó una investigación que explora un nuevo método para automatizar la recolección, procesamiento, y análisis de redes de transporte utilizando vehículos aéreos no tripulados y visión artificial tecnológica. Si bien existen metodologías actuales para realizar la evaluación de carreteras de forma manual y de forma semiautónoma, esta investigación es una prueba de concepto para obtener la evaluación

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

de la carretera más rápido y más barato con una visión de poca o ninguna interacción humana requerida. Esta investigación evalúa las fortalezas de aplicar la tecnología UAV a las evaluaciones de pavimento e identifica dónde más se necesita trabajo. Además, valida el uso de vehículos aéreos no tripulados como una forma viable de seguir recolectando información sobre el pavimento con el fin de ayudar a los administradores de activos a mantener los activos viales envejecidos.

El sistema pudo capturar fotos de carreteras adecuadas para pavimento semiautomático Procesamiento de índice de condición (PCI), sin embargo, el algoritmo dio como resultado una medida F máxima de 40%. Este resultado es bajo e indica que el algoritmo no es suficiente para PCI completamente automatizado clasificación. Detectar con precisión los defectos de la carretera mediante la visión por computadora sigue siendo un desafío problema para futuras investigaciones. Sin embargo, se muestra que el uso de UAV autónomos para recopilar los datos ser una vía viable para la recopilación de datos, y teóricamente más rápida que los métodos actuales en velocidades de autopista.

Saad y Tahar (2019), realizaron un estudio cuyo objetivo fue evaluar baches en la superficie de la carretera mediante el uso de UAV .

La metodología utilizada constó de cuatro fases, a saber: reconocimiento y planificación del sitio, adquisición de datos, procesamiento de datos y análisis de resultados y datos. La adquisición de datos se basó en la diferencia de altitudes para determinar el efecto de la resolución en la extracción de baches y grietas. En el estudio, el procesamiento de datos se realiza mediante el uso de un software fotogramétrico que se basó en la estructura del movimiento.

La evaluación de la precisión en este estudio se basa en la comparación de datos reales y medidos, que solo se concentra en muestras de baches y baches. Se encontró que la baja altitud da un mejor resultado en comparación con la gran altitud.

En conclusión, este estudio demostró la capacidad de la imagen del UAV multirrotor para la extracción de baches y patologías. Este sistema proporciona una medición detallada y precisa de los baches y patologías de la carretera y, por lo tanto, mejora la eficiencia del control del estado de la carretera.

Se encontró que la baja altitud da un mejor resultado en comparación con la gran altitud. El estudio demostró la capacidad de la imagen del UAV multirrotor para la extracción de baches y patologías.

7. MARCO TEÓRICO

7.1 DEFINICIONES:

- **Gestión vial:**

La gestión de infraestructura vial es una disciplina de la ingeniería civil que permite diagnosticar, evaluar, planificar y programar objetivamente el mantenimiento de los activos viales en toda su vida útil, optimizando el uso de los recursos disponibles. (Solminihaç et al. 2018).

- **Geomática**

El término Geomática hace referencia a un conjunto de ciencias en las cuales se integran los medios para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica. El término «geomática» está compuesto por dos ramas GEO Tierra y MÁTICA por Informática, el estudio de la superficie terrestre a través de la informática (tratamiento automático de la información). También es llamada información espacial o geoespacial (INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI - IGAC, 2018)

- **Fotogrametría**

Fotogrametría es el arte, la ciencia y la tecnología para obtener información confiable sobre objetos físicos y el medio ambiente a través de procesos de registro, medición e interpretación de imágenes y patrones de energía radiante electromagnética y otros fenómenos (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS, 2020)

- **VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado)**

Un vehículo aéreo no tripulado VANT o UAV (del inglés unmanned aerial vehicle), también denominados UAS (del inglés Unmanned Aerial System) o RPAS (del inglés Remotely Piloted Aircraft System), comúnmente conocido como Dron, hace referencia a una aeronave y sus elementos asociados, que vuela sin tripulación ni piloto, el cual ejerce su función remotamente. Un VANT es un vehículo sin tripulación, reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado, sostenido y propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción (European Aviation Safety Agency - EASA, 2020)

- **Sensores Remotos**

Sensores Remotos o Teledetección, es la ciencia y el arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis de datos adquiridos mediante un dispositivo, el cual no está en contacto directo con el objeto, área ni fenómeno que se está investigando. Reúne muchas técnicas y procesos que permiten obtener una imagen de la superficie terrestre de forma remota captada por sensores situados en satélites o aviones que captan las relaciones espectrales y espaciales de objetos, para posteriormente esta imagen ser

tratada e interpretada con el objetivo de obtener información de la superficie terrestre y de sus cambios teniendo en cuenta que esta información es global, objetiva, periódica y digital (Lara y Chamorro, 2018, como se citó en Lillesand & Kiefer, 1994).

- **Pavement Condition Index (PCI)**

Este método fue desarrollado en por el Banco Mundial y adoptado por The American Public Works Association and American Society for Testing and Materials (ASTM) (Attoh-Okine y Adarkwa, 2013). El PCI es un indicador numérico, que califica y proporciona una medida actual de la condición de del pavimento, basada en las patologías observadas en la superficie. También indica la integridad estructural y la condición operativa de la superficie (rugosidad y seguridad localizadas). El PCI no puede medir la capacidad estructural, ni proporciona una medición directa de la resistencia al deslizamiento o la rugosidad. Proporciona una base objetiva y racional para determinar las necesidades y prioridades de mantenimiento y reparación. El monitoreo continuo del PCI, se utiliza para establecer la tasa de deterioro del pavimento, lo que permite la identificación temprana de las principales necesidades de rehabilitación. Así mismo proporciona comentarios sobre el comportamiento del pavimento, para la validación o mejora del diseño actual y los procedimientos de mantenimiento. (ASTM D6433-18, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018)

- **VIZIR**

Es un método francés (LPCP, 1991) que clasifica las patologías de los pavimentos asfálticos en dos grandes categorías, A y B, y permite la determinación de un Índice de deterioro superficial. Las patologías del tipo A caracterizan una condición estructural del pavimento, ligada a las condiciones de las diversas capas del pavimento y el suelo de subrasante, así como a las capas asfálticas. Se trata de degradaciones debidas a insuficiencia en la capacidad estructural de la calzada, cuyo remedio suele requerir el conocimiento de otros criterios de valoración (ensayos de resistencia o de respuesta, deflexiones, etc.).

Las patologías del tipo B, en su mayoría son de tipo funcional y dan lugar a reparaciones que generalmente no están ligadas a la capacidad estructural de la calzada. Su origen se encuentra en deficiencias constructivas y en condiciones locales particulares que el tránsito ayuda a poner en evidencia. Entre las patologías del tipo B se pueden citar los fisuramientos motivados por asuntos distintos a la fatiga, los desprendimientos y los afloramientos. Para el inventario de las patologías sobre la superficie del pavimento, se divide el tramo vial en unidades de muestreo de 100 m de longitud. (Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras, INVIAS 2008, como se citó en LCPC, 1991)

7.2 ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI – Pavement Condition Index)

A Continuación, se describe la metodología PCI, adoptada en Colombia con el manual PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI) PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS Y DE CONCRETO EN CARRETERAS (Vásquez Varela, 2002).

El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un pavimento fallado o en mal estado, hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado. En la tabla 7, se presentan los rangos de PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento.

Tabla 7. Rangos de calificación del PCI

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

Nota: Vásquez Varela, 2002. Adaptado por el autor

El cálculo del PCI se fundamenta en los resultados de un inventario visual de la condición del pavimento en el cual se establecen CLASE, SEVERIDAD y CANTIDAD de cada patología registrada. El PCI se desarrolló para obtener un índice de la integridad estructural del pavimento y de la condición operacional de la superficie. La información de las patologías obtenida como parte del inventario ofrece una percepción clara de las causas de las patologías y su relación con las cargas o con el clima.

7.2.1 Procedimiento de evaluación de la condición del pavimento

La primera etapa corresponde al trabajo de campo en el cual se identifican las patologías teniendo en cuenta la clase, severidad y extensión de los mismos. Esta información se registra en formatos adecuados para tal fin. En la tabla 8, se presenta el formato para la inspección de pavimentos asfálticos.

- Tipos de Patología:
 1. Piel de cocodrilo
 2. Exudación
 3. Agrietamiento en bloque
 4. Abultamientos y hundimientos.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

5. Corrugación
6. Depresión
7. Grieta de borde
8. Grieta de reflexión de junta
9. Desnivel carril / berma.
10. Grietas longitudinal y transversal.
11. Parcheo
12. Agregado pulido
13. Huecos
14. Cruce de vía férrea
15. Ahuellamiento.
16. Desplazamiento.
17. Grieta parabólica (slippage)
18. Hinchamiento
19. Desprendimiento de agregados

Tabla 8. Formato de inspección de pavimentos asfálticos

Unidad de muestra:		Ancho (m)							
Longitud. (m):		Área (m²):							
Ubicación:						Fecha:			
PATOLIGIA Y SEVERIDAD	CANTIDAD						TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO

Nota: Vásquez Varela, 2002. Adaptada por el autor.

7.2.2 Unidades de Muestreo

Se divide la vía en secciones o “unidades de muestreo”, cuyas dimensiones varían de acuerdo con los tipos de vía y de capa de rodadura:

Para carreteras con capa de rodadura asfáltica y ancho menor que 7.30 m, el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango **230.0 ± 93.0 m²**. En la tabla 9, se presentan algunas relaciones longitud – ancho de calzada pavimentada.

Tabla 9. Longitudes de unidades de muestreo asfálticas

Ancho de calzada (m)	Longitud de la unidad de muestreo (m)
5.0	46.0
5.5	41.8
6.0	38.3
6.5	35.4
7.3 (máximo)	31.5

Nota: Vásquez Varela, 2002. Adaptada por el autor

Se recomienda tomar el valor medio de los rangos y en ningún caso definir unidades por fuera de aquellos. Para cada pavimento inspeccionado se sugiere la elaboración de esquemas que muestren el tamaño y la localización de las unidades ya que servirá para referencia futura.

7.2.3 Determinación de las Unidades de Muestreo para Evaluación

En la “Evaluación De Una Red” vial puede tenerse un número muy grande de unidades de muestreo cuya inspección demandará tiempo y recursos considerables; por lo tanto, es necesario aplicar un proceso de muestreo.

En la “Evaluación de un Proyecto” se deben inspeccionar todas las unidades; sin embargo, de no ser posible, el número mínimo de unidades de muestreo que deben evaluarse se obtiene mediante la Ecuación 1, la cual produce un estimado del PCI ± 5 del promedio verdadero con una confiabilidad del 95%.

$$n = \frac{N \times \sigma^2}{\frac{e^2}{4} \times (N - 1) + \sigma^2} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

n : Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

N : Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento.

e : Error admisible en el estimativo del PCI de la sección ($e = 5\%$)

σ : Desviación estándar del PCI entre las unidades.

Durante la inspección inicial se asume una desviación estándar del PCI de 10 para pavimento asfáltico (rango PCI de 25) y de 15 para pavimento de concreto (rango PCI de 35) En inspecciones subsecuentes se usará la desviación estándar real (o el rango PCI) de la inspección previa en la determinación del número mínimo de unidades que deben

evaluarse.

Cuando el número mínimo de unidades a evaluar es menor que cinco ($n < 5$), todas las unidades deberán evaluarse.

7.2.4 Selección de las Unidades de Muestreo para Inspección

Se recomienda que las unidades elegidas estén igualmente espaciadas a lo largo de la sección de pavimento y que la primera de ellas se elija al azar (aleatoriedad sistemática) de la siguiente manera:

a. El intervalo de muestreo (i) se expresa mediante la Ecuación 2:

$$i = \frac{N}{n} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

N: Número total de unidades de muestreo disponible.

n: Número mínimo de unidades para evaluar.

i: Intervalo de muestreo, se redondea al número entero inferior (por ejemplo, 3.7 se redondea a 3)

b. El inicio al azar se selecciona entre la unidad de muestreo 1 y el intervalo de muestreo i .

Así, si $i = 3$, la unidad inicial de muestreo a inspeccionar puede estar entre 1 y 3. Las unidades de muestreo para evaluación se identifican como (S), (S + 1), (S + 2), etc.

Siguiendo con el ejemplo, si la unidad inicial de muestreo para inspección seleccionada es 2 y el intervalo de muestreo (i) es igual a 3, las subsiguientes unidades de muestreo a inspeccionar serían 5, 8, 11, 14, etc.

Sin embargo, si se requieren cantidades de patologías exactas para pliegos de licitación (rehabilitación), todas y cada una de las unidades de muestreo deberán ser inspeccionadas.

7.2.5 Selección de Unidades de Muestreo Adicionales

Uno de los mayores inconvenientes del método aleatorio es la exclusión del proceso de inspección y evaluación de algunas unidades de muestreo en muy mal estado. También puede suceder que unidades de muestreo que tienen patologías que sólo se presentan una vez (por ejemplo, “*cruce de línea férrea*”) queden incluidas de forma inapropiada en un muestreo aleatorio.

Para evitar lo anterior, la inspección deberá establecer cualquier unidad de muestreo

inusual e inspeccionarla como una “*unidad adicional*” en lugar de una “*unidad representativa*” o aleatoria. Cuando se incluyen unidades de muestreo adicionales, el cálculo del PCI es ligeramente modificado para prevenir la extrapolación de las condiciones inusuales en toda la sección.

7.2.6 Evaluación de la Condición

El procedimiento varía de acuerdo con el tipo de superficie del pavimento que se inspecciona. Debe seguirse estrictamente la definición de las patologías de este manual para obtener un valor del PCI confiable.

La evaluación de la condición incluye los siguientes aspectos:

- Equipo.
 - Odómetro manual para medir las longitudes y las áreas de las patologías.
 - Regla y una cinta métrica para establecer las profundidades de los ahuellamientos o depresiones.
 - Manual de Patologías del PCI con los formatos correspondientes y en cantidad suficiente para el desarrollo de la actividad.
- Procedimiento: Se inspecciona una unidad de muestreo para medir el tipo, cantidad y severidad de las patologías de acuerdo con el Manual de Patologías y se registra la información en el formato correspondiente. Se deben conocer y seguir estrictamente las definiciones y procedimientos de medida las patologías. Se usa un formulario u “*hoja de información de exploración de la condición*” para cada unidad muestreo y en los formatos cada renglón se usa para registrar una patología, su extensión y su nivel de severidad.
- El equipo de inspección deberá implementar todas las medidas de seguridad para su desplazamiento en la vía inspeccionada, tales como dispositivos de señalización y advertencia para el vehículo acompañante y para el personal en la vía.

7.2.7 Cálculo del PCI de las unidades de muestreo

Al completar la inspección de campo, la información sobre las patologías se utiliza para calcular el PCI. El cálculo puede ser manual o computarizado y se basa en los “*Valores Deducidos*” de cada patología de acuerdo con la cantidad y severidad reportadas.

Etapas 1. Cálculo de los Valores Deducidos:

1. a. Totalice cada tipo y nivel de severidad de la patología y regístrelo en la columna TOTAL del formato PCI-01. La medida puede ser en área, longitud o por número según su tipo

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

1. b. Divida la CANTIDAD de cada clase de patología, en cada nivel de severidad, entre el ÁREA TOTAL de la unidad de muestreo y exprese el resultado como porcentaje. Esta es la DENSIDAD de la patología, con el nivel de severidad especificado, dentro de la unidad en estudio.

1. c. Determine el VALOR DEDUCIDO para cada tipo de patología y su nivel de severidad mediante las curvas denominadas “**Valor Deducido de La Patología**” de acuerdo con el tipo de pavimento inspeccionado. Las gráficas de estas curvas se presentan en el Anexo F de este documento.

Etapla 2. Cálculo del Número Máximo Admisible de Valores Deducidos (m)

a. Si ninguno o tan sólo uno de los “Valores Deducidos” es mayor que 2, se usa el “Valor Deducido Total” en lugar del mayor “Valor Deducido Corregido”, CDV, obtenido en la *Etapla* 4. De lo contrario, deben seguirse los pasos 2.b. y 2.c.

2. b. Liste los valores deducidos individuales deducidos de mayor a menor.

2. c. Determine el “Número Máximo Admisible de Valores Deducidos” (m), utilizando la Ecuación 3:

$$m = 100 + \frac{9}{98} (100 - HDV) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

m : Número máximo admisible de “valores deducidos”, incluyendo fracción, para la unidad de muestreo i .

HDV: El *mayor valor deducido individual* para la unidad de muestreo i .

2. d. El número de valores individuales deducidos se reduce a m , inclusive la parte fraccionaria. Si se dispone de menos valores deducidos que m se utilizan todos los que se tengan.

Etapla 3. Cálculo del “Máximo Valor Deducido Corregido”, CDV.

El máximo CDV se determina mediante el siguiente proceso iterativo:

3. a. Determine el número de valores deducidos, q , mayores que 2.0.

3. b. Determine el “Valor Deducido Total” sumando TODOS los valores deducidos individuales.

3. c. Determine el CDV con q y el “Valor Deducido Total” en la curva de corrección pertinente al tipo de pavimento.

3. d. Reduzca a 2.0 el menor de los “Valores Deducidos” individuales que sea mayor que

2.0 y repita las etapas 3.a. a 3.c. hasta que **q** sea igual a 1.

3. e. El máximo CDV es el mayor de los CDV obtenidos en este proceso.

Etapla 4. Calcule el PCI de la unidad restando de 100 el máximo CDV obtenido en la Etapa 3. En la tabla 10 se presenta un formato para el desarrollo del proceso iterativo de obtención del “Máximo Valor Deducido Corregido”, CDV. En la tabla 10 se presenta el formato para las iteraciones del cálculo del CDV de inspección de pavimentos asfálticos.

Tabla 10. Formato para las iteraciones del cálculo del CDV de inspección de pavimentos asfálticos.

No.	Valores Deducidos										Total	q	CDV
1													
2													

Nota: Vásquez Varela, 2002. Adaptado por el autor.

7.2.8 Cálculo del PCI de una sección de pavimento.

Una sección de pavimento abarca varias unidades de muestreo. Si todas las unidades de muestreo son inventariadas, el PCI de la sección será el promedio de los PCI calculados en las unidades de muestreo.

Si se utilizó la técnica del muestreo, se emplea otro procedimiento. Si la selección de las unidades de muestreo para inspección se hizo mediante la técnica aleatoria sistemática o con base en la representatividad de la sección, el PCI será el promedio de los PCI de las unidades de muestreo inspeccionadas. Si se usaron unidades de muestreo adicionales se usa un promedio ponderado calculado como se muestra en la ecuación 4.

$$PCIS = \frac{[(N - A) * PCIR] + (A * PCIA)}{N} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

PCIS: PCI de la sección del pavimento.

PCIR: PCI promedio de las unidades de muestreo aleatorias o representativas.

PCIA promedio de las unidades de muestreo adicionales.

N: Número total de unidades de muestreo en la sección.

A: Número adicional de unidades de muestreo inspeccionadas.

7.2.9 Manual de patologías

En la tabla 11, se presenta las patologías que se involucran en el cálculo del PCI, con su descripción, unidad de medida y severidad.

Tabla 11. Descripción de patologías y niveles de severidad PCI.

No.	PATOLOGÍA	MEDIDA	SEVERIDAD	DESCRIPCIÓN
1	Piel de cocodrilo	m ²	BAJA (L)	Grietas finas longitudinales de forma paralela con pocas o ninguna interconexión, sin descascaramientos a lo largo de las mismas.
			MEDIA (M)	Grietas con interconexión generando un patrón con un ligero descascaramiento.
			ALTA (H)	Grietas bien definidas con desprendimientos de material en los bordes y en algún caso con movimientos independientes a la acción del tráfico.
2	Exudación	m ²	BAJA (L)	Se hace visible durante unos pocos días del año y el asfalto no se pega a los zapatos o vehículos.
			MEDIA (M)	Se hace visible durante pocas semanas del año y el asfalto se pega a los zapatos o vehículos.
			ALTA (H)	Se hace visible durante varias semanas del año, ha ocurrido de forma extensa y el asfalto se pega a los zapatos o vehículos.
3	Agrietamiento en bloque	m ²	BAJA (L)	Bloques definidos con grietas longitudinales y transversales de severidad baja.
			MEDIA (M)	Bloques definidos con grietas longitudinales y transversales de severidad media.
			ALTA (H)	Bloques definidos con grietas longitudinales y transversales de severidad alta.
4	Abultamientos y Hundimientos	m	BAJA (L)	Originan una calidad de tránsito de baja severidad.
			MEDIA (M)	Originan una calidad de tránsito de media severidad.
			ALTA (H)	Originan una calidad de tránsito de alta severidad.
5	Corrugación	m ²	BAJA (L)	Originan una calidad de tránsito de baja severidad.
			MEDIA (M)	Originan una calidad de tránsito de media severidad.
			ALTA (H)	Originan una calidad de tránsito de alta severidad.
6	Depresión	m ²	BAJA (L)	13.0 a 25.0 mm.

No.	PATOLOGÍA	MEDIDA	SEVERIDAD	DESCRIPCIÓN
			MEDIA (M)	25.0 a 51.0 mm.
			ALTA (H)	Más de 51.0 mm.
7	Grieta de Borde	m	BAJA (L)	Agrietamiento bajo o medio sin fragmentación o desprendimiento.
			MEDIA (M)	Grietas medias con algo de fragmentación o desprendimiento.
			ALTA (H)	Considerable fragmentación o desprendimiento a lo largo del borde.
8	Grietas de reflexión de junta.	m	BAJA (L)	1. Grieta sin relleno de ancho menor de 10.0 mm 2. Grieta rellena de cualquier ancho (con condición satisfactoria de material llenante).
			MEDIA (M)	1. Grieta sin relleno con ancho entre 10.0 mm y 76.0 mm. 2. Grieta sin relleno de cualquier ancho hasta 76.0 mm rodeada de un ligero agrietamiento aleatorio 3. Grieta rellena de cualquier ancho rodeada de un ligero agrietamiento aleatorio.
			ALTA (H)	1. Cualquier grieta rellena o no, rodeada de un agrietamiento aleatorio de media o alta severidad 2. Grietas sin relleno de más de 76.0 mm. 3. Una grieta de cualquier ancho en la cual unas pocas pulgadas del pavimento alrededor de la misma están severamente fracturadas (la grieta está severamente fracturada).
9	Desnivel Carril/berma	m	BAJA (L)	Diferencia de elevación entre el borde del pavimento y la berma está entre 25.0 mm y 51.0 mm.
			MEDIA (M)	La diferencia está entre 51.0 mm y 102.0 mm.
			ALTA (H)	La diferencia en elevación es mayor a 102.0 mm.
10	Grieta Longitudinal y Transversal	m	BAJA (L)	1. Grieta sin relleno de ancho menor que 10.0 mm. 2. Grieta rellena de cualquier ancho (con condición satisfactoria del material llenante).

No.	PATOLOGÍA	MEDIDA	SEVERIDAD	DESCRIPCIÓN
			MEDIA (M)	1. Grieta sin relleno de ancho entre 10.0 mm y 76.0 mm. 2. Grieta sin relleno de cualquier ancho hasta 76.0 mm, rodeada de grietas aleatorias pequeñas. 3. Grieta rellena de cualquier ancho, rodeada de grietas aleatorias pequeñas.
			ALTA (H)	1. Cualquier grieta rellena o no, rodeada de un agrietamiento aleatorio de media o alta severidad 2. Grietas sin relleno de más de 76.0 mm de ancho. 3. Una grieta de cualquier ancho en la cual unas pocas pulgadas del pavimento alrededor de la misma están severamente fracturadas.
11	Parcheo	m ²	BAJA (L)	El parche presenta una buena condición y la calidad del tránsito se califica como de baja severidad o mejor.
			MEDIA (M)	Parche moderadamente deteriorado o la calidad del tránsito se califica como de severidad media.
			ALTA (H)	El parche está muy deteriorado o la calidad del tránsito se califica como de alta severidad.
12	Agregado pulido	m ²	N/A	El grado de pulimento deberá ser significativo antes de ser incluido en una evaluación de condición y contabilizado como defecto.
13	Huecos		BAJA (L)	Diámetro medio: 102 a 203 mm. Profundidad máxima del hueco 12.7 a 25.4 mm y >25.4 mm a 50.8 mm. Diámetro medio: 203 a 457 mm. Profundidad máxima del hueco 12.7 a 25.4 mm
			MEDIA (M)	Diámetro medio: 102 a 203 mm. Profundidad máxima del hueco >50.8 mm. Diámetro medio: 203 a 457 mm. Profundidad máxima del hueco 12.7 a 25.4 mm y > 25.4 mm a 50.8 mm. Diámetro medio: 457 a 762 mm. Profundidad máxima del hueco 12.7

No.	PATOLOGÍA	MEDIDA	SEVERIDAD	DESCRIPCIÓN
				a 25.4 mm.
			ALTA (H)	Diámetro medio: 457 a 762 mm. Profundidad máxima del hueco > 25.4 mm a 50.8 mm y > 50.8 mm.
14	Cruce de vía férrea	m ²	BAJA (L)	Cruce de vía férrea que produce calidad de tránsito de baja severidad.
			MEDIA (M)	Cruce de vía férrea que produce calidad de tránsito de media severidad.
			ALTA (H)	Cruce de vía férrea que produce calidad de tránsito de alta severidad.
15	Ahuellamiento	m ²	BAJA (L)	6.0 mm a 13.0 mm
			MEDIA (M)	> 13.0 mm a 25.0 mm
			ALTA (H)	> 25.0 mm
16	Desplazamiento	m ²	BAJA (L)	El desplazamiento causa calidad de tránsito de baja severidad.
			MEDIA (M)	El desplazamiento causa calidad de tránsito de media severidad.
			ALTA (H)	El desplazamiento causa calidad de tránsito de alta severidad.
17	Grietas parabólicas (Slippage)	m ²	BAJA (L)	Ancho promedio de la grieta menor a 10.0 mm
			MEDIA (M)	1. Ancho promedio de la grieta entre 10.0 mm y 38.0 mm 2. El área alrededor de la grieta está fracturada en varios pedazos ajustados.
			ALTA (H)	1. Ancho promedio de la grieta mayor que 38.0 mm. 2. El área alrededor de la grieta está fracturada y los pedazos son fácilmente removibles.
18	Hinchamiento	m ²	BAJA (L)	Calidad de tránsito de baja severidad.
			MEDIA (M)	Calidad de tránsito de severidad media.
			ALTA (H)	Calidad de tránsito de severidad alta.
19	Meteorización/ Desprendimiento de agregados.	m ²	BAJA (L)	Se inicia el desprendimiento de agregados o pérdida del ligante y la superficie empieza a deprimirse, en caso de derrame de aceite únicamente se observa la mancha.

No.	PATOLOGÍA	MEDIDA	SEVERIDAD	DESCRIPCIÓN
			MEDIA (M)	Se ha perdido los agregados o el ligante y su textura es ligeramente rugosa y ahuecada, en el caso de derrame su superficie se vuelve suave penetrable con una moneda.
			ALTA (H)	Se ha perdido los agregados o el ligante en forma considerable su textura es rugosa y extremadamente ahuecada con diámetros menores a 10.0 mm de diámetro y 13.0 mm de profundidad, en caso de derrame de aceite el ligante asfáltico ha perdido su efecto y el agregado se encuentra suelto.

Nota: Díaz Cárdenas, 2014.

7.3 ÍNDICE DE DETERIORO SUPERFICIAL (IS) METODOLIGIA VIZIR

A continuación, se describe un resumen de la Guía Metodológica Para Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras, del Instituto Nacional de Vía INVIAS 2008, donde se adoptó la metodología VIZIR que considera dos categorías de patologías: las patologías del Tipo “A”, que caracterizan la condición estructural del pavimento y las patologías del Tipo “B”, en su mayoría de tipo funcional.

En las tablas 12 y 13, se presentan listados de las diferentes patologías relevantes de cada tipo, a cada uno de los cuales se le ha asignado un código (abreviatura) que permite la identificación precisa de cada uno de ellos.

Tabla 12. Patologías del Tipo A

NOMBRE DE LA PATOLOGÍA	CÓDIGO	UNIDAD DE MEDIDA
Ahuellamiento	AH	m
Depresiones o hundimientos longitudinales	DL	m
Depresiones o hundimientos transversales	DT	m
Fisuras longitudinales por fatiga	FLF	m
Fisuras piel de cocodrilo	FPC	m
Bacheos y parcheos	B	m

Nota: Leguizamón M, 2008. Adaptada por el Autor

Tabla 13. Patologías del Tipo B

NOMBRE DE LA PATOLOGÍA	CÓDIGO	UNIDAD DE MEDIDA
Fisura longitudinal de junta de construcción	FLJ	m
Fisura transversal de junta de construcción	FTJ	m
Fisuras de contracción térmica	FCT	m
Fisuras parabólicas	FP	m
Fisura de borde	FB	m
Ojos de pescado	O	un
Desplazamiento o abultamiento o ahuellamiento de la mezcla	DM	m
Pérdida de la película de ligante	PL	m
Pérdida de agregados	PA	m
Descascaramiento	D	m ²
Pulimento de agregados	PU	m
Exudación	EX	m
Afloramiento de mortero	AM	m
Afloramiento de agua	AA	m
Desintegración de los bordes del pavimento	DB	m
Escalonamiento entre calzada y berma	ECB	m
Erosión de las bermas	EB	m
Segregación	S	m

Nota: Leguizamón M, 2008. Adaptada por el Autor

El proceso del levantamiento de las patologías involucra dos etapas. La primera es la “planificación”, donde básicamente se organizan las tareas por realizar, definiendo temas tales como la localización de la carretera, la longitud del tramo por estudiar, la programación, el plazo para la ejecución del trabajo, el rendimiento deseado y la cantidad requerida de personal.

Una segunda etapa, corresponde directamente al “levantamiento de las patologías”, la cual involucra la calificación de éstas, a partir de los siguientes pasos:

Paso 1. Identificación de la patología.

Paso 2. Medición (extensión).

Paso 3. Gravedad.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

Para la identificación de la patología se deberán seguir las indicaciones y recomendaciones que al respecto se presentan en el numeral B.3 de la guía metodológica, donde se describen los diferentes tipos de patologías de los pavimentos asfálticos de las carreteras nacionales.

La medición de las patologías que corresponde básicamente a la extensión para las patologías del tipo A y para la mayoría de los casos de patologías del tipo B, que se presentan en las tablas 12 y 13, respectivamente, está dada por el porcentaje de la longitud de la sección (100 metros) que se encuentra afectada por la patología respectiva, salvo en los casos en los cuales se indica otra unidad de medida.

La gravedad indica el grado de severidad de la patología. Su valoración está dada en una escala de uno (1) a tres (3), donde 3 indica la mayor severidad de la patología, 2 una severidad moderada y 1 la menor severidad. En las tablas 14 y 15, se presentan las patologías de cada tipo con la descripción del nivel de severidad.

Tabla 14 Niveles de gravedad de las patologías del Tipo A

PATOLOGÍA	NIVEL DE GRAVEDAD		
	1	2	3
Ahuellamiento y otras deformaciones estructurales	Sensible al usuario, pero poco importante Profundidad < 20 mm	Deformaciones importantes. Hundimientos localizados o ahuellamientos. $20\text{ mm} \leq \text{Profundidad} \leq 40\text{ mm}$	Deformaciones que afectan de manera importante la comodidad y la seguridad de los usuarios. Profundidad > 40 mm
Fisuras longitudinales por fatiga	Fisuras finas en la huella de rodamiento. < 6 mm	Fisuras abiertas y a menudo ramificadas.	Fisuras muy ramificadas, y/o muy abiertas. Bordes de fisuras ocasionalmente degradados.
Piel de cocodrilo	Piel de cocodrilo formada por mallas (> 500 mm) con fisuración fina, sin pérdida de materiales.	Mallas más densas (< 500 mm), con pérdidas ocasionales de materiales, desprendimientos y ojos de pescado en formación.	Mallas con grietas muy abiertas y con fragmentos separados. Las mallas son muy densas (< 200 mm), con pérdida ocasional o generalizada de materiales.
Bacheos y parcheos	Intervención de superficie ligada a patologías tipo B.	Intervenciones ligadas a patologías tipo A	
		Comportamiento satisfactorio de la reparación.	Ocurrencia de fallas en las zonas reparadas.

Nota: Leguizamón M, 2008. Adaptada por el Autor

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

Tabla 15. Niveles de gravedad de las patologías del Tipo B

PATOLOGÍA		NIVEL DE GRAVEDAD			
		1	2	3	
Fisura longitudinal de junta de construcción		Fina y única < 6 mm	Ancha (≤ 6 mm) sin desprendimiento o Fina ramificada	Ancha (≤ 6 mm) con desprendimientos o ramificada	
Fisuras de contracción térmica.		Fisuras finas < 6 mm	Anchas (≤ 6 mm) sin desprendimiento, o finas con desprendimiento o fisuras ramificadas	Anchas (≤ 6 mm) con desprendimientos	
Fisuras parabólicas.		Fisuras finas < 6 mm	Anchas (≤ 6 mm) sin desprendimientos	Anchas (≤ 6 mm) con desprendimientos	
Fisuras de borde		Fisuras finas < 6 mm	Anchas (≤ 6 mm) sin desprendimientos	Anchas (≤ 6 mm) con desprendimientos	
Abultamientos		$h < 20$ mm	$20 \text{ mm} \leq h \leq 40$ mm	$h > 40$ mm.	
Ojos de Pescado * (por cada 100 m)	Cantidad.	< 5	5 a 10	< 5	> 10
	Diámetro (mm)	≤ 300	≤ 300	≤ 1000	≤ 300
Desprendimientos: - Pérdida de película de ligante. - Pérdida de agregado		Pérdidas aisladas	Pérdidas continuas		Pérdidas generalizadas y muy marcadas
Descascaramiento	Prof.(mm)	≤ 25	≤ 25	> 25	> 25
	Área(m ²)	≤ 0.8	> 0.8	≤ 0.8	> 08
Agregado pulido		Long. Comprometida < 10% de la sección (100m).	Long. Comprometida $\geq 10\%$ a < 50% de la sección (100m)	Long. Comprometida > 50% de la sección (100m)	
Exudación		Puntual, área específica	Continúa sobre las trayectorias por donde circulan las ruedas del Vehículo.	Continua y muy marcada, en diversas aéreas.	
Afloramientos: - De mortero - De agua		Localizados y apenas perceptibles	Intensos	Muy intensos	
Desintegración de los bordes del pavimento		Inicio de la desintegración, sectores localizados	La calzada ha sido afectada en un ancho de 500 mm o más.	Erosión extrema que conduce a la desintegración del revestimiento asfáltico	
Escalonamiento entre calzadas y Berma		Desnivel entre 10 mm a 50 mm	Desnivel entre 50 y 100 mm	Desnivel superior a 100 mm	

PATOLOGÍA	NIVEL DE GRAVEDAD		
	1	2	3
Erosión de las bermas	Erosión incipiente	Erosión pronunciada	La erosión pone en peligro la estabilidad de la calzada y la Seguridad de los usuarios.
Segregación	Longitud comprometida < 10% de la sección (100 m).	Long. comprometida $\geq 10\%$ a < 50% de la sección (100m)	Long. comprometida > 50% de la sección (100 m)

Nota: Leguizamón M, 2008. Adaptada por el Autor

7.3.1 Procesamiento y presentación de la información

La información recolectada en terreno del inventario de las patologías presentes en los pavimentos asfálticos, debe ser procesada diligenciando los formatos respectivos.

Se debe registrar la longitud, en metros, de cada sección analizada. Se debe registrar la extensión, que corresponde al área en metros comprometida con la patología, el porcentaje del área afectada con respecto a la sección y el nivel de gravedad, definido como un número entero con valores de 1, 2 o 3.

Las patologías del tipo A que se deben registrar son: ahuellamiento (AH) depresiones o hundimientos longitudinales (DL), depresiones o hundimientos transversales (DT), fisuras longitudinales por fatiga (FLF), fisuras piel de cocodrilo (FPC) y bacheos y parcheos (B).

Como es posible que una o más patologías se presenten en una misma sección con distintos niveles de gravedad, el nivel representativo se debe establecer cómo un promedio ponderado, mediante la expresión que se muestra en la ecuación 5:

$$G = \frac{a1 + 2a2 + 3a3}{a1 + a2 + a3} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde: a área ocupada por la patología con gravedad "i" dentro de la sección o unidad de muestreo. Como la gravedad es un número entero (1, 2 o 3), el valor obtenido al realizar la ponderación se deberá redondear de acuerdo con el siguiente criterio:

Si $G < 1.5$	se toma 1
Si $1.5 \leq G < 2.5$	se toma 2
Si $G \geq 2.5$	se toma 3

7.3.2 Cálculo del Índice de Deterioro Superficial “Is”

Para el cálculo del Índice de Deterioro Superficial “Is”, utilizamos el formato B4 de la *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. Instituto Nacional de Vías INVIAS 2008*. En este cálculo solo se tienen en cuenta las patologías del tipo A y su valoración está definida de forma cuantitativa por un número que puede presentar valores que varían entre 1 y 7

En los campos correspondientes al cálculo del *Índice de Fisuración (If)* se registran de forma individual, para las patologías FLF y FPC, la extensión que corresponde al área en metros, comprometida con la patología; y el nivel de gravedad, definido como un número entero con valores de 1, 2 o 3 y el Índice de Fisuración (campos If(1) e If(2)). En el campo Índice de Fisuración “If” se debe registrar el mayor de los índices If(1) e If(2) calculados.

En los campos correspondientes al cálculo del *Índice de Deformación (Id)* se debe registrar, para las patologías AH, DL y DT, la extensión que corresponde al área en metros, comprometida con la patología; y el nivel de gravedad, definido como un número entero con valores de 1, 2 o 3 y el Índice de Deformación “Id”.

En el campo *Índice de Deterioro Superficial Inicial Is*, se debe registrar el valor obtenido en el primer cálculo realizado de este índice, a partir de la combinación del If y del Id. Posteriormente, y si es del caso, se procederá a determinar el valor de la corrección, en función de la extensión y de la gravedad de los parcheos y bacheos en la sección.

En el campo Índice de Deterioro Superficial Final Is, se debe registrar el valor obtenido al sumar el índice de deterioro superficial inicial y el valor por corrección si éste existe; de lo contrario, el valor del Is final, será igual al calculado para el Is inicial.

La columna final, denominada “categoría”, corresponde a una variable cualitativa que permite calificar la condición superficial del pavimento, a partir de los valores del Índice de Deterioro Superficial Final, transformados en tres categorías, como muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Agrupación del Is en categorías como variable cualitativa (Condición del pavimento según el inventario)

CATEGORÍA	Is
Condición buena	1-2
Condición marginal	3-4
Condición deficiente	5 – 6 - 7

Nota: Leguizamón M, 2008. Adaptada por el Autor

En la figura 7.1, se muestrea el formato B4, donde se realiza el cálculo del índice de Deterioro Superficial Is, para pavimentos asfálticos.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

FORMATO B4. CALCULO INDICE DE DETERIORO SUPERFICIAL IS																		
Nombre de la carretera:						Proyecto:												
Código de la carretera:						Elaboró:						Fecha(dd/mm/aa):						
Del PR:		Al PR:		Aprobó:					Fecha(dd/mm/aa):						Hoja:		de	

Examen Visual

(1) Índice de Fisuración If	Extension	0 a 10 %	10 a 50 %	> 50 %
	Gravedad			
1		1	2	3
2		2	3	4
3		3	4	5

Índice de Deformación Id	Extension	0 a 10 %	10 a 50 %	> 50 %
	Gravedad			
1		1	2	3
2		2	3	4
3		3	4	5

(1) Cálculo efectuado separadamente de la fisuración longitudinal y la fatiga. Se adoptan el mayor de los dos valores calculados.

Primer Calificación del Índice de Deterioro, **Is**

If \ Id	0	1 - 2	3	4 - 5
0	1	2	3	4
1 - 2	3	3	4	5
3	4	5	5	6
4 - 5	5	6	7	7

Extension	0 a 10 %	10 a 50 %	> 50 %
Gravedad			
1	0	0	0
2	0	0	+1
3	0	+1	+1

Corrección por reparación

Índice de Deterioro Superficial **Is. 1 a 7**

Figura 7.1: Formato para las registro y cálculo del índice de deterioro superficial **Is**

Nota: Instituto Nacional de Vías INVIAS 2008. Adaptado por el autor.

7.4 MARCO LEGAL

Las operaciones de los VANT en Colombia, están reguladas por la AEROCIVIL, mediante la Resolución 04201 de 2018, que fue publicada en el diario oficial de Colombia No. 50.858 del 5 de febrero de 2019 y rige a partir del 5 de agosto de 2019.

En (SKYFLY, 2019) Se presenta el siguiente resumen de la resolución:

Mediante esta Resolución, se incorporan a la norma RAC 91 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia disposiciones sobre operación de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAV o Drones), se numeran como Apéndice 13 y se adoptan otras disposiciones.

Dentro del ámbito de aplicación este Apéndice establece reglas que rigen los requisitos de operación de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) con peso (masa) máximo al despegue (MTOW) superior a 250 gr, usados en actividades civiles, cualquiera que sea el propósito de utilización, que se efectúen dentro del espacio aéreo en el cual tenga jurisdicción el Estado colombiano.

A toda persona natural o jurídica, que: explote u opere UAS con MTOW superior a 250 gr, con cualquier finalidad o certifique capacitación y entrenamiento en la operación de UAS.

Este apéndice no será aplicable para:

- Operaciones con aeromodelos. las cuales se encuentran reguladas en la Norma RAC 4, Numeral 4.25.8.
- Operación de UAS con MTOW menor a 250 gr.
- Operaciones desarrolladas en totalidad en espacios cubiertos o confinados.

7.4.1 Clasificación de las operaciones con drones

Las operaciones con drones se clasifican, de acuerdo con el riesgo operacional, así:

Clase A:

Corresponde a la operación de drones que cuentan con un MTOW superior a 250 gr y de hasta 25 kg, y que cumplan con las limitaciones de la clase A, por lo cual no requieren de autorización de la UAEAC, dado que su operación representa un mínimo riesgo.

Estos UAV, teniendo en cuenta que en su operación pueden asimilarse a aeromodelos, estarán sujetos, además, a los requisitos y limitaciones establecidos en los literales a), b),

d), s). g). h) e i) del numeral 4.25.8 de la norma RAC 4 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia.

Clase B:

Corresponde a la operación de drones que no se encuentren dentro de la Clase A por desviación de las limitaciones establecidas o que cuenten con un MTOW superior a 25 kg y de hasta 150 kg, por lo cual requerirán siempre de autorización de la UAEAC, aun cuando su operación podría implicar un muy bajo riesgo.

Clase C:

Corresponde a la operación de drones que no se encuentren dentro de la Clase B por desviación de las limitaciones establecidas o con MTOW superior a 150 kg, que hagan sobrevuelos internacionales y aquellos que presten servicios de transporte, para los cuales, por ahora, no se autoriza su operación en el espacio aéreo donde tenga jurisdicción el Estado colombiano, aun cuando su operación pudiera ser de bajo riesgo.

7.4.2 Limitaciones de operación de drones según su clase

De acuerdo con la clasificación determinada por la Resolución 04201 de 2018, los drones tienen ciertas limitaciones en su operación. Es así como para cada clase, se especifican las principales limitaciones, así:

Clase A:

- El drone debe tener un MTOW máximo de 25 kg.
- No puede exceder una velocidad de 80 km/h.
- El drone debe estar en el alcance de línea de vista del operador en un radio máximo de operación de 500 m.
- La operación no puede efectuarse sobre aglomeraciones de personas, edificios, en ciudades u otras áreas pobladas.
- La operación debe efectuarse sólo en horas diurnas.
- Todo vuelo debe efectuarse a una altura no superior a 123 m sobre tierra o sobre agua.
- No se podrán realizar actividades de aspersión (fumigación) aérea ni ningún otro trabajo aéreo especial diferente de la simple captura de imágenes, fijas o en movimiento.

Clase B:

- El drone debe tener un MTOW máximo de 150 kg.
- No puede exceder una velocidad de 160 km/h.

- El dron debe estar en el alcance de línea de vista del operador en un radio máximo de operación de 750 m.
- Cualquier operación aérea que implique trabajos aéreos especiales diferentes de la simple captura de imágenes, fijas o en movimiento, requerirá de permiso especial de la UAEAC.
- Todo vuelo debe efectuarse a una altura no superior a 123 m sobre tierra o sobre agua.
- No se podrán realizar operaciones de búsqueda y salvamento (SAR) o similares que entorpezcan las ejecutadas por las autoridades y organismos de socorro o sin la debida coordinación previa con ellos. Excepto cuando se trate de operaciones de aspersión agrícola debidamente autorizadas, no deberá arrojararse objeto alguno desde la UA estando en vuelo.

Clase C:

- Debido a que esta clase, por el momento, tiene restringida sus operaciones en Colombia, la UAEAC ha definido.
- Los requisitos de operación para esta clase de UAS quedan sujetas a la expedición de los SARPs (Normas y procedimientos recomendados expedidos por la OACI) dentro del respectivo proceso de enmienda a los correspondientes al Anexo técnico sobre la aviación civil i internacional.
- No obstante, lo previsto en lo anterior, si cualquier persona en Colombia desarrolla o importa un UAS que, por sus características corresponda a la Clase C, la UAEAC podrá autorizar su operación con carácter experimental, para lo cual será posible designar áreas especiales del espacio aéreo.
- En caso de que se den operaciones experimentales, la UAEAC se reserva el derecho a hacer el debido seguimiento de las mismas con miras a recopilar elementos e información que pudiera ser útil para un posterior desarrollo normativo.

7.4.3 Otros aspectos reglamentados según la clasificación

A continuación, se mencionan algunos aspectos que también fueron regulados por la Resolución 04201 de 2018 para cada clase:

Clase A:

Condiciones de operación que debe asegurar el operador.

- Se reglamenta la inscripción de todo propietario de drones con limitaciones de operación en la clase A, en la base de datos de la UAEAC.

Clase B:

Condiciones de operación que debe asegurar el operador.

- Se reglamenta la inscripción del explotador y del operador de drones con limitaciones de operación en la clase B, en la base de datos de la UAEAC.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

- Se definen las condiciones mínimas técnicas que deben cumplir todos los drones en la Clase B.
- Se reglamentan los requisitos de operación y para los operadores, dentro de los cuales se ajustan las condiciones de la capacitación teórica y del curso práctico.
- Se definen las obligaciones del explotador de drones en la Clase B.
- Requisitos de mantenimiento de drones en la Clase B.

La figura 7.2, muestra el resumen de la reglamentación descrita:



Figura 7.2. Restricciones y requisitos de vuelo para Drones.

Nota: (Cárdenas, Holguín y Zabala, (2019)

8. METODOLOGÍA, PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS

El trabajo se desarrolló en cuatro etapas, como se muestra en la figura 8.1:

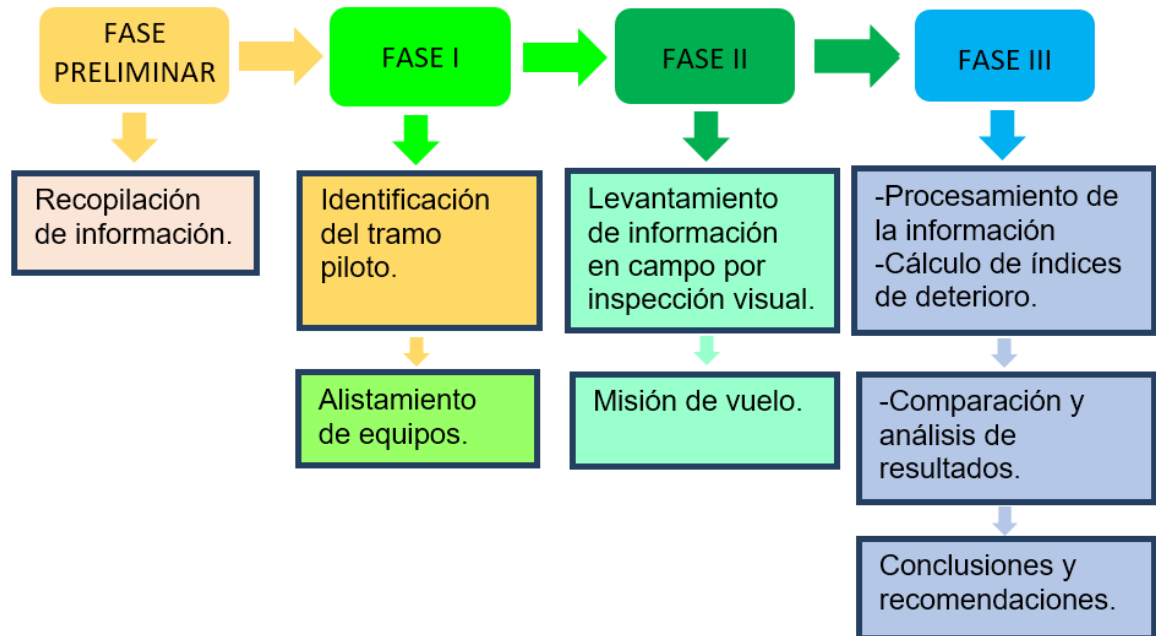


Figura 8.1. Etapas del proyecto.

Nota: Elaboración propia

8.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Este aspecto se abordó en el capítulo 6 del documento

8.2 IDENTIFICACIÓN DEL TRAMO PILOTO

Dado que la investigación se enfoca en el levantamiento de patologías superficiales en pavimentos de vías secundarios principalmente, se identificaron varios tramos viales en la zona de la Sabana de Bogotá y alrededores que presentan características adecuadas, para desarrollar el trabajo. Estas son vías secundarias con pavimento flexible y con deterioros visibles.

Se determinó tomar como tramo piloto un segmento de 1.0km de longitud en la parte inicial de la vía Siberia – Tenjo (K0+000 – K1+000), dada la cercanía a Bogotá, lo cual facilitó el desplazamiento al sitio para realizar del trabajo de campo. En la figura 8.2 se muestra la localización del tramo piloto para el estudio.

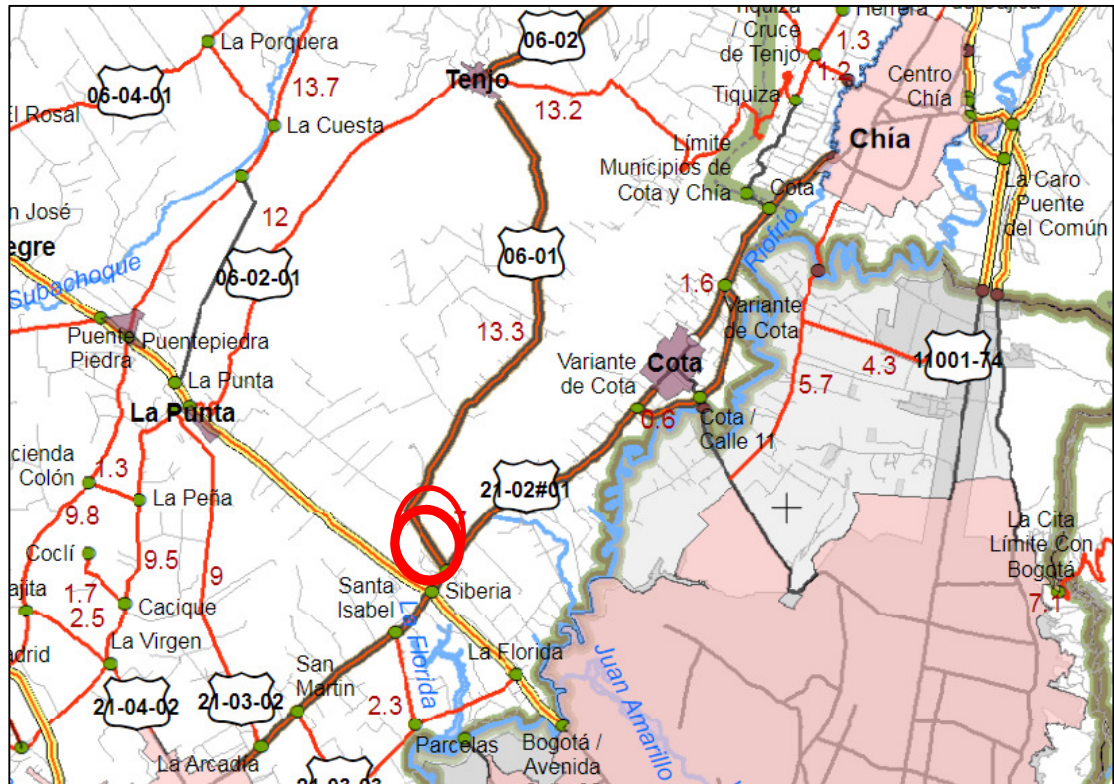


Figura 8.2. Localización tramo piloto para el estudio

Nota: Invias, Adaptada por el Autor

8.2.1 Características generales de la vía Siberia - Tenjo

La vía Siberia –Tenjo, se localiza al occidente de la Sabana de Bogotá, sirve de ingreso al municipio de Tenjo desde la ciudad de Bogotá, por la salida de la calle 80 y su inicio está a 800 m del puente de Siberia, por el costado occidente de la vía Siberia –Cota que hace parte de la concesión Chía-Mosquera Girardot y tiene una longitud de 12 km, hasta la entrada a Tenjo.

El trazado de esta vía discurre por un terreno de topografía plana con algunas pequeñas ondulaciones. Su carpeta de rodadura es en pavimento flexible y su sección transversal tiene un ancho promedio de 6.5 m, compuesta por una calzada bidireccional, sin bermas. El pavimento en términos generales se observa en buen estado, aunque hay algunos tramos en regulares condiciones que muestran deterioros visibles.

8.3 ALISTAMIENTO DE EQUIPOS:

- **Equipo de vuelo**

Para la toma de imágenes de alta resolución, se utilizó un VANT modelo DJI Phantom 4, que está equipado con una cámara de 20 Mega Píxeles y un sistema de sensores de georreferenciación y estabilización.

El Phantom 4 está equipado con un sensor CMOS de 1 pulgada, que puede grabar videos 4K / 60fps y fotos de 20 Mega Píxeles. El sistema de transmisión OcuSync 2.0 HD garantiza una conectividad y confiabilidad estables, cinco direcciones de detección de obstáculos garantizan seguridad adicional y un controlador remoto dedicado garantiza una precisión y control aún mayores. Una amplia gama de características inteligentes hace que volar sea mucho más fácil. El Phantom 4 Pro V2.0 es una solución completa de imágenes aéreas, diseñada para el creador profesional. Ofrece un tiempo de vuelo máximo de 30 minutos y un rango de control de 7 km.

Las IMU y las brújulas redundantes monitorean datos críticos y descartan posibles errores, mejorando la confiabilidad del vuelo. La detección de obstáculos en cinco direcciones mejora la seguridad y la experiencia general de vuelo. En la figura 8.3 se presenta una imagen del VANT DJI Phantom 4.



Figura 8.3. VANT DJI Phantom 4.

Nota: DJI (website <https://www.dji.com>)

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

En la tabla 17, se presentan algunas características básicas del VANT DJI Phantom 4:

Tabla 17. Características VANT DJI Phantom 4

Característica	Valor
Peso (batería y hélices incluidas)	1388 g
Tamaño diagonal (hélices excluidas)	350 mm
Máxima velocidad	49 km/h con la evitación de obstáculos multidireccional
Techo de servicio máximo sobre el nivel del mar	19685 feet (6000 m)
Resistencia máxima a la velocidad del viento	10 m/s
Max tiempo de vuelo	30 minutos
Tiempo de carga de batería	1.5 horas
Rango de temperatura de funcionamiento	32° to 104 °F (0° to 40 °C)
Cámara	CMOS 20 MP
Sistemas de posicionamiento satelital	GPS/GLONASS

Nota: DJI (website <https://www.dji.com>)

- **Software y Equipo de Cómputo:**

Las imágenes se procesaron mediante el software PIX4D mapper, paquete fotogramétrico para mapeo con Drones. Este software se instaló en un equipo de cómputo con procesador Intel i7, 16G en Ram, disco SSD, 500 G y tarjeta de video integrada.

También se usó Civil3D de Autodesk, para dibujo y generación de planos topográficos.

8.4 TRABAJO DE CAMPO

Para lograr los objetivos planteados, se realizó un trabajo de campo, conformado por dos actividades, a saber:

8.4.1 Levantamiento de patologías de pavimento mediante inspección visual

Antes de iniciar esta actividad, se dividió el tramo de estudio en segmentos o unidades de muestreo de 40 m de longitud a lo largo de la vía, para poder realizar la comparación con las metodologías PCI y Vizir, de acuerdo con los objetivos del trabajo planteados. La medida de las unidades de muestreo se establece de acuerdo con metodología PCI, donde se indica que el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango $230.0 \pm 93.0 \text{ m}^2$ (Vásquez Varela, L. R., 2002). La metodología Vizir, indica unidades de muestreo de 100 m de longitud (INVIAS, 2008).

En la tabla 18, se presentan algunas relaciones longitud – ancho de calzada pavimentada, de la metodología PCI, para establecer la longitud de unidades de muestreo:

Tabla 18. Unidades de muestreo PCI

Unidad de muestreo Ancho de Calzada (m)	Longitud de la unidad de muestreo (m)
5.0	46.0
5.5	41.8
6.0	38.3
6.5	35.4
7.3 (máximo)	31.5

Nota : Pavement Condition Index (PCI), Ingepav, 2002

De acuerdo con la tabla 18, para este estudio se estableció una longitud de unidad de muestreo de 40 m. Una vez establecida la unidad de muestreo, se procedió a realizar la inspección visual del tramo vial en estudio, identificando y registrando paso a paso las diferentes patologías que se observaron en la superficie del pavimento, teniendo en cuenta su tipo, cantidad, severidad y dimensiones. Este procedimiento se realizó en cada unidad de muestreo a lo largo del tramo vial y para referenciar su medida y la de las patologías observadas, se utilizó odómetro convencional.

En el Anexo A, se presenta el registro de s patologías del pavimento, tomados a lo largo de la vía por medio de inspección visual, de acuerdo con la identificación de patologías y severidades de la metodología PCI descritas en el numeral 6.2:

8.4.2 Levantamiento de información con VANT DJI Phantom 4:

La otra actividad de campo consistió en realizar la toma de imágenes de alta resolución mediante el VANT DJI Phantom 4, en una misión de vuelo a lo largo del tramo vial en estudio, debidamente diseñada y ejecutado por un piloto certificado que garantiza la

seguridad del procedimiento y la confiabilidad de la información levantada. Para este estudio se estableció como parámetro para el vuelo un GSD o resolución de imágenes <2 cm Pixel.

- **Plan de Vuelo**

Los DJI Phantom 4, tienen la aplicación DJI GS Pro, para diseño de planes de vuelo. De acuerdo con la calidad de las imágenes a tomar (<2 cm Pixel), se incorporó en la aplicación los datos o parámetros de vuelo relevantes, tales como límites geográficos del tramo vial, altura del vuelo, solape longitudinal y transversal, de las imágenes, entre otros. Con esta información, la aplicación calcula el número de imágenes a tomar y la duración de la misión, lo que permite gestionar el uso de las baterías.

- **Ejecución y Operación del Vuelo**

Una vez diseñado el plan de vuelo, se determinó una zona de despegue cerca de la zona del estudio, teniendo en cuenta que no existieran obstáculos para que el VANT pueda elevarse sin interferencias físicas.

Previo al despegue del vuelo se hizo una lista de chequeo para verificar la seguridad la de la misión:

1. Hélices colocadas correctamente.
2. Batería con toda su carga tanto en el VANT como el radiocontrol.
3. Conexión correcta entre el radiocontrol y el VANT.
4. Recepción de señal de GPS con 10 o más satélites.
5. Establecer punto de despegue y retorno en caso de pérdida de señal.
6. Tarjeta de memoria vacía y colocada correctamente.
7. Plan de vuelo cargado correctamente.
8. Condiciones meteorológicas adecuadas.

Una vez que el VANT despegó, no fue necesario tener el control manual por parte del piloto, salvo que se requiera cancelar el vuelo. No obstante, se monitoreo en tiempo real la ubicación, velocidad, trayectoria, imagen de transmisión, número de satélites del GPS, cantidad de fotografías realizadas y porcentaje de la batería del equipo.

8.5 TRABAJO DE OFICINA

8.5.1 Procesamiento de imágenes tomadas con el VANT

En el equipo de cómputo y con ayuda del software de Fotogrametría Pix4D Mapper, se realizó el procesamiento de la información tomada en campo con el VANT DJI Phantom 4. Mediante un proceso de ortorectificación de cada imagen capturada donde se elimina la perspectiva de cada imagen individual para crear consistencia en todo el mapa,

manteniendo el mismo nivel de detalle de la imagen original. Las ortofotos se corrigen en función de la perspectiva, la inclinación de la cámara y la distorsión del objetivo. Esto significa que estas fotografías se pueden escalar con precisión de una imagen a otra, lo que hace que las mediciones topográficas sean fiables en cuanto a las distancias reales, sin distorsiones, y con mejora en la visibilidad de los detalles que pueden no ser visibles utilizando técnicas de fotogrametría más comunes (DJI <https://www.dji.com>).

Con este proceso se generó un mosaico que une en una sola franja todas las imágenes denominadas ortofotomosaico.

Con ayuda del software Civil3D, el ortofotomosaico obtenido se dividió en los segmentos que conforman las unidades de muestreo definidas a lo largo de la vía del estudio, para su clasificación y cálculo.

8.5.2 Inventario de patologías del pavimento, utilizando las imágenes tomadas mediante el VANT DJI Phantom

Sobre el mosaico de ortofotos generado y segmentado, se hizo la identificación e inventario de los diferentes tipos de patologías, en las unidades de muestreo establecidas, realizando mediciones de longitud o área según el tipo de falla, de manera precisa, directamente sobre el ortofotomosaico, con ayuda del software Civil3D. Esta información junto con la severidad de cada falla, se registró en los formatos respectivos y elaborados en hoja de cálculo.

En el Anexo B, se presenta el registro de patologías de pavimento con su medida y severidad, obtenidos de las imágenes tomadas con el VANT a lo largo de la vía, de acuerdo con la identificación de patologías y severidades descritas en el numeral 7.2. En el Anexo H, se presentan los esquemas de las imágenes tomadas con el VANT junto con el respectivo registro de patologías a lo largo de la vía y segmentados en las unidades de muestreo.

8.5.3 Cálculo del índice de condición del pavimento por metodología PCI a partir de inventario de patologías realizado mediante inspección visual en sitio

En equipo de cómputo y con ayuda de la hoja de cálculo Excel, se procesó la información de los registros tabulados de patologías obtenidas mediante la inspección visual en campo a lo largo de la vía del estudio y luego se aplicaron las ecuaciones y cálculos de acuerdo con lo indicado por esta metodología, para finalmente obtener el índice de condición de estado del pavimento (PCI), en la vía del estudio.

En el Anexo C se presentan los cálculos para obtener el índice de condición del pavimento (PCI), en cada una de las unidades de muestreo en que se dividió la vía del estudio, a partir

de la información tomada en el inventario de patologías realizado en campo mediante inspección visual, a lo largo de la vía.

8.5.4 Cálculo del índice de condición de deterioro superficial (IS), por metodología VIZIR a partir del inventario de patologías realizado mediante inspección visual en sitio

En equipo de cómputo y con ayuda de la hoja de cálculo Excel, se procesó la información de los registros tabulados correspondientes a patologías del pavimento, obtenidas en la inspección visual en campo. Luego se aplicaron las ecuaciones y cálculos de acuerdo con lo indicado por esta metodología, para finalmente obtener el índice de deterioro superficial (IS) del pavimento en la vía del estudio.

En el Anexo D, se presentan los cálculos para obtener el índice de deterioro superficial (IS), en cada una de las unidades de muestreo en que se dividió la vía del estudio, a partir de la información tomada en el inventario de patologías realizado en campo mediante inspección visual a lo largo de la vía, de acuerdo con la identificación de patologías y severidades descritas en el numeral 7.3.

8.5.5 Cálculo del índice de condición del pavimento por metodología PCI (Pavement Condition Index) a partir de inventario de patologías realizado mediante imágenes georreferenciadas tomadas con el VANT

Igualmente, en equipo de cómputo y con ayuda de la hoja de cálculo Excel, se procesó la información de los registros tabulados de patologías obtenidas mediante la inspección visual sobre las imágenes obtenidas con el VANT y luego se aplicaron las ecuaciones y cálculos de acuerdo con lo indicado por esta metodología, para finalmente obtener el índice de condición de estado del pavimento (PCI), en la vía del estudio.

En el Anexo E, se presentan los cálculos para obtener el índice de condición del pavimento (PCI), en cada una de las unidades de muestreo en que se dividió la vía del estudio, a partir de la información tomada en el inventario de patologías realizado en equipo de cómputo sobre las imágenes georreferenciadas tomadas con el VANT, a lo largo de la vía.

8.5.6 Cálculo del índice de condición de deterioro superficial (IS), por metodología VIZIR a partir del inventario de patologías realizado sobre imágenes georreferenciadas tomadas con el VANT

En equipo de cómputo y con ayuda de la hoja de cálculo Excel, se procesó la información de los registros tabulados correspondientes a patologías del pavimento, obtenidas mediante la inspección visual sobre las imágenes obtenidas con el VANT. Luego se aplicaron las

ecuaciones y cálculos de acuerdo con lo indicado por esta metodología, para finalmente obtener el índice de deterioro superficial (IS) del pavimento en la vía del estudio.

En el Anexo F, se presentan los cálculos para obtener el índice de deterioro superficial (IS), en cada una de las unidades de muestreo en que se dividió la vía del estudio, a partir de la información tomada en el inventario de patologías realizado sobre imágenes georreferenciadas tomadas con el VANT, a lo largo de la vía, de acuerdo con la identificación de patologías y severidades descritas en el numeral 7.3:

8.6 COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con la información levantada en campo a través de inspección visual y la información levantada sobre las imágenes tomadas con el VANT DJI Phantom 4 y luego de aplicar las metodologías VIZIR y PCI respectivamente, en este estudio se han obtenido cuatro (4) índices de estado del pavimento para el tramo vial del estudio, cuyos resultados a continuación serán objeto de comparación y análisis

8.5.7 Comparación y análisis PCI

En la tabla 19, se presentan los resultados del método PCI obtenido en cada unidad de muestreo con la información levantada por los procedimientos de inspección visual en campo y por medio de inspección visual sobre imágenes georreferenciadas obtenidas con el VANT DJI Phantom 4.

Tabla 19. Comparación PCI

ID	LOCALIZACIÓN	LEVANTAMIENTO EN CAMPO		LEVANTAMIENTO SOBRE IMAGENES VANT		DIFERENCIA
		PCI	Condición	PCI	Condición	
1	K0+0 - K0+40	74.7	MUY	72.4	MUY BUENO	-2.3
2	K0+40 - K0+80	100	EXCELENT	100	EXCELENTE	0
3	K0+80 - K0+120	94.6	EXCELENT	95.8	EXCELENTE	1.2
4	K0+120 - K0+160	99.8	EXCELENT	100	EXCELENTE	0.2
5	K0+160 - K0+200	100	EXCELENT	100	EXCELENTE	0
6	K0+200 - K0+240	99.8	EXCELENT	98.9	EXCELENTE	-0.9
7	K0+240 - K0+280	21.5	MUY MALO	20.3	MUY MALO	-1.2
8	K0+280 - K0+320	16.1	MUY MALO	14.0	MUY MALO	-2.1
9	K0+320 - K0+360	7.8	FALLADO	9.7	FALLADO	1.9
10	K0+360 - K0+400	10.9	MUY MALO	10.5	MUY MALO	-0.4
11	K0+400 - K0+440	25.3	MALO	39.6	MALO	14.3
12	K0+440 - K0+480	56.7	BUENO	59.4	BUENO	2.7
13	K0+480 - K0+520	34.3	MALO	31.3	MALO	-3
14	K0+520 - K0+560	21.3	MUY MALO	22.3	MUY MALO	1
15	K0+560 - K0+600	34.0	MALO	46.6	REGULAR	12.6
16	K0+600 - K0+640	59.8	BUENO	61.7	BUENO	1.9
17	K0+640 - K0+680	4.9	FALLADO	19.7	MUY MALO	14.8

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

ID	LOCALIZACIÓN	LEVANTAMIENTO EN CAMPO		LEVANTAMIENTO SOBRE IMAGENES VANT		DIFERENCIA
		PCI	Condición	PCI	Condición	
18	K0+680 - K0+720	28.1	MALO	31.0	MALO	2.9
19	K0+720 - K0+760	0.0	FALLADO	0.0	FALLADO	0
20	K0+760 - K0+800	0.0	FALLADO	0.0	FALLADO	0
21	K0+800 - K0+840	10.3	MUY MALO	8.1	FALLADO	-2.2
22	K0+840 - K0+880	16.2	MUY MALO	21.7	MUY MALO	5.5
23	K0+880 - K0+920	22.0	MUY MALO	22.4	MUY MALO	0.4
24	K0+920 - K0+960	32.8	MALO	37.7	MALO	4.9
25	K0+960 - K0+1000	45.9	REGULAR	53.7	REGULAR	7.8

Condición general	40.672	REGULAR	43.072	REGULAR	2.4
--------------------------	---------------	----------------	---------------	----------------	------------

Nota: Elaborada por el autor

De acuerdo con lo observado en la tabla 19, en términos generales se tiene una diferencia de 2.68 unidades en el PCI obtenido con la información levantada en campo por medio de inspección visual, respecto al PCI obtenido por medio de inspección visual sobre imágenes georreferenciadas obtenidas con el VANT DJI Phantom 4 y la condición que se obtiene para el pavimento es REGULAR, en los dos procedimientos.

Lo anterior evidencia que los dos procedimientos generan resultados similares. Esto indica que el uso de imágenes georreferenciadas tomadas VANT DJI Phantom 4 para el levantamiento de patologías del pavimento, es confiable usando la metodología PCI y representa una alternativa a implementar como herramienta en la gestión vial. En la gráfica de la figura 8.4, se puede observar la comparación descrita.

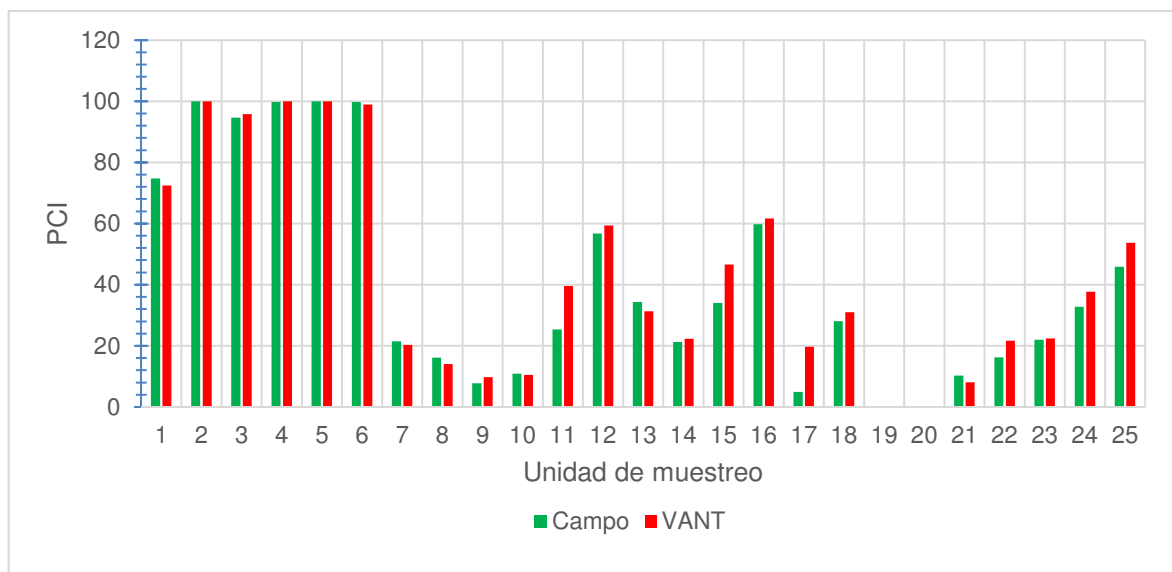


Figura 8.4: Comparación PCI obtenido en cada unidad de muestreo.

Nota: Elaborado por el autor

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

En la tabla 20, se muestra la cantidad de unidades de muestreo de acuerdo a cada condición de pavimento obtenidas en el tramo vial estudiado.

Tabla 20. Cantidad de unidades de muestro se acuerdo a la condición del pavimento

CONDICION	LEVANTAMIENTO EN CAMPO		LEVANTAMIENTO SOBRE IMAGENES VANT	
	UNIDADES DE MUESTREO	%	UNIDADES DE MUESTREO	%
Excelente	5	20%	5	20%
Muy bueno	1	4%	1	4%
Bueno	2	8%	2	8%
Regular	1	4%	2	8%
Malo	5	20%	4	16%
Muy malo	7	28%	7	28%
Fallado	4	16%	4	16%

Nota: Elaborada por el autor

De acuerdo con la tabla 20, se observa que la cantidad de unidades de muestreo en cada condición de pavimento obtenida, es igual en los dos procedimientos excepto para las condiciones REGULAR y MALO, cuya diferencia es una unidad de muestreo. En la gráfica de la figura 8.5, se observa esta situación:

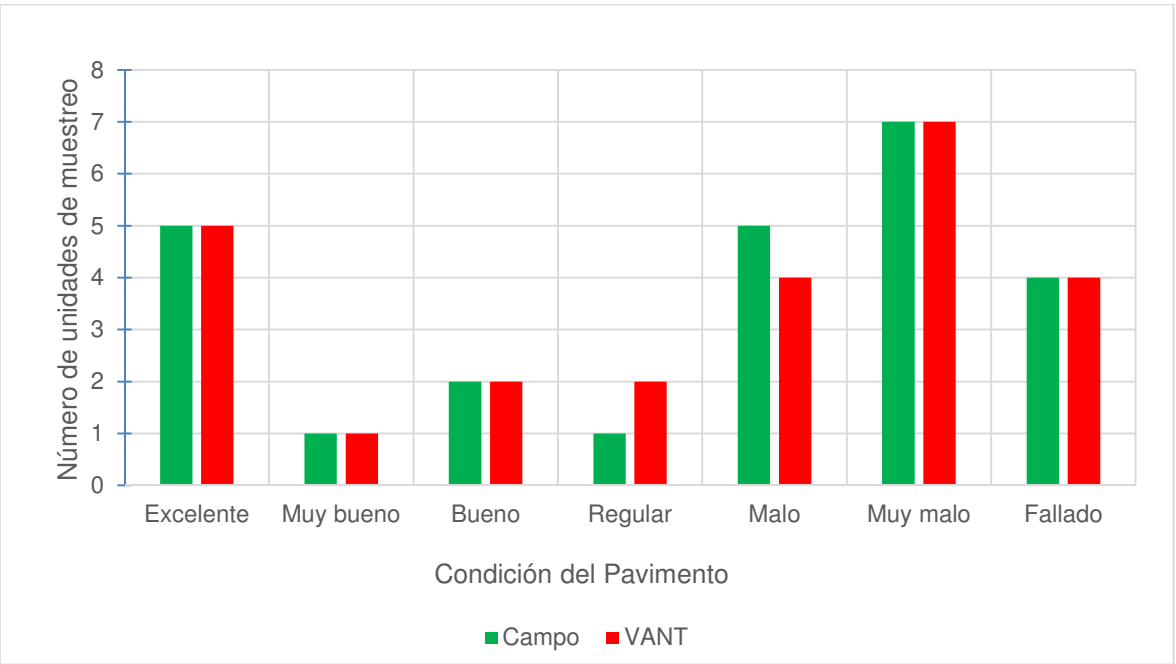


Figura 8.5: Cantidad de unidades de muestreo en cada condición de pavimento

Nota: Elaborado por el autor

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

En la tabla 21, se presenta la comparación de la afectación por tipo de patologías con su respectiva severidad, en la totalidad del tramo vial del estudio, levantados en campo por medio de inspección visual y las patologías levantadas por medio de inspección visual sobre imágenes georreferenciadas obtenidas con el VANT DJI Phantom 4.

Tabla 21. Comparación afectación por tipo de patologías y severidad

LEVANTAMIENTO EN CAMPO				LEVANTAMIENTO SOBRE IMAGENES VANT				DIF. %
Área Total 6396 m2				Área Total 6396 m2				
Patología y severidad	Afectación total	% de Afectación	%Peso	Patología y severidad	Afectación total	% de Afectación	%Peso	
1L	45.000	0.70%	2.39%	1L	67.860	1.06%	3.55%	0.36%
1M	165.750	2.59%	8.79%	1M	75.650	1.18%	3.96%	-1.41%
1H	307.000	4.80%	16.29%	1H	355.000	5.55%	18.58%	0.75%
3L	130.250	2.04%	6.91%	3L	141.795	2.22%	7.42%	0.18%
3M	119.000	1.86%	6.31%	3M	126.030	1.97%	6.60%	0.11%
3H	29.500	0.46%	1.56%	3H	7.000	0.11%	0.37%	-0.35%
4L	164.000	2.56%	8.70%	4L	266.480	4.17%	13.95%	1.60%
4M	10.000	0.16%	0.53%	4M	22.300	0.35%	1.17%	0.19%
4H	254.000	3.97%	13.47%	4H	254.500	3.98%	13.32%	0.01%
7H	1.800	0.03%	0.10%	7H	3.000	0.05%	0.16%	0.02%
8M	35.000	0.55%	1.86%	8M			0.00%	-0.55%
8H	7.000	0.11%	0.37%	8H	10.000	0.16%	0.52%	0.05%
10H			0.00%	10H	2.000	0.03%	0.10%	0.03%
10L	284.500	4.45%	15.09%	10L	290.300	4.54%	15.19%	0.09%
10M	132.000	2.06%	7.00%	10M	128.000	2.00%	6.70%	-0.06%
11L	75.000	1.17%	3.98%	11L	76.620	1.20%	4.01%	0.03%
11M	6.300	0.10%	0.33%	11M	5.170	0.08%	0.27%	-0.02%
11H	54.000	0.84%	2.86%	11H	56.200	0.88%	2.94%	0.03%
13M	27.240	0.43%	1.44%	13M	21.200	0.33%	1.11%	-0.09%
13H	7.790	0.12%	0.41%	13H	1.700	0.03%	0.09%	-0.10%
15M	30.000	0.47%	1.59%					-0.47%
TOTALES	1885.130	29.47%	1.000		1910.805	29.88%	1.000	0.40%

Nota: Elaborada por el autor

De acuerdo con lo mostrado en la tabla 21, se observa que las patologías que afectan en mayor extensión al tramo vial en estudio son Piel de Cocodrilo (1), Fisuras Longitudinales y Transversales (10), Fisuras en Bloque (3) y Abultamientos y Hundimiento (4). Esta condición es similar en los dos procedimientos.

Respecto a la extensión total afectada, se observa que, en los registros del levantamiento en campo por inspección visual, se tiene un área afectada de 1885.13 m2, lo que representa un 29.47% del tramo vial estudiado. En los registros del levantamiento sobre imágenes

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

VANT, se tiene una afectación de 1910.805 m², lo que representa un 29.88 % del tramo vial estudiado con una diferencia de 0.4% entre los dos procedimientos. Esto evidencia la homogeneidad de la información registrada y en los resultados obtenidos por los dos procedimientos.

Igualmente se observa algunos tipos de patologías que se registraron en un procedimiento y en otro no. En el caso de ahuellamiento (15), sobre las imágenes tomadas con el VANT, no es posible apreciar esta patología, debido a que corresponde a una deformación vertical que no se evidencia en una imagen tomada ortogonalmente a la superficie. Esto puede ocurrir con otras patologías como el agregado pulido, hundimientos y exudación.

Para los tipos de patologías más representativas, la medición de extensión afectada resulta ser muy práctico y confiable en las imágenes tomadas con el VANT, mientras que en el inventario en campo por inspección visual la medición generalmente tiene desviaciones respecto a la medida real.

En la gráfica de la figura 8.6, se muestra el peso que tiene cada tipo de patología con su respectiva severidad, dentro de la afectación total en el tramo vial estudiado:

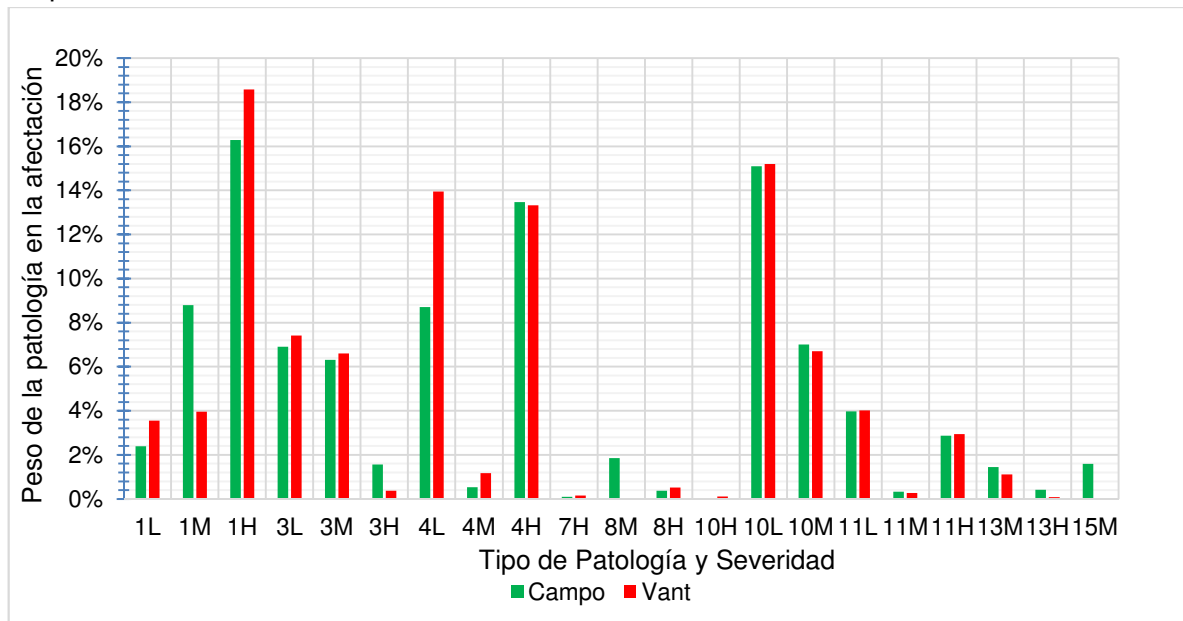


Figura 8.6: Peso por patología, según su severidad en la afectación total, metodología PCI.

Nota: Elaborado por el autor.

De acuerdo con lo observado en la gráfica de la figura 8.6, existe similitud en el peso que cada patología con su respectiva severidad representa dentro de la afectación total en los dos procedimientos. Esto indica que la observación de patologías realizada sobre imágenes tomadas con el VANT es comparable con la observación realizada por medio de inspección visual en campo.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

En la tabla 22, se muestra la afectación por patologías y totalizando los tipos de severidad.

Tabla 22. Comparación afectación por tipo de patologías totales

PATOLOGÍA	ID	LEVANTAMIENTO EN SITIO			LEVANTAMIENTO SOBRE IMAGENES VANT			DIF. %
		Área afectada m2	% de Afectación	% Peso	Área afectada m2	% de Afectación	% Peso	
Piel de Cocodrilo	1	517.750	8.09%	27.5%	498.510	7.79%	26.4%	0.30%
Grietas en Bloque	3	278.750	4.36%	14.8%	274.825	4.30%	14.6%	0.06%
Abultamiento o Hundimientos	4	428.000	6.69%	22.7%	543.280	8.49%	28.8%	- 1.80%
Grietas de Borde	7	1.800	0.03%	0.1%	3.000	0.05%	0.2%	- 0.02%
Grietas de reflexión de junta	8	42.000	0.66%	2.2%	10.000	0.16%	0.5%	0.50%
Grietas Transversales y Longitudinales	10	416.500	6.51%	22.1%	420.300	6.57%	22.3%	- 0.06%
Parcheo	11	135.300	2.12%	7.2%	137.990	2.16%	7.3%	- 0.04%
Huecos	13	35.030	0.55%	1.9%	22.900	0.36%	1.2%	0.19%
Ahuellamiento	15	30.000	0.47%	1.6%	0.000	0.00%	0.0%	0.47%

Nota: Elaborada por el autor

En la gráfica de la figura 8.7, se muestra el peso que tiene cada tipo de patología sumando los tipos de severidad dentro de la afectación total en el tramo vial estudiado.

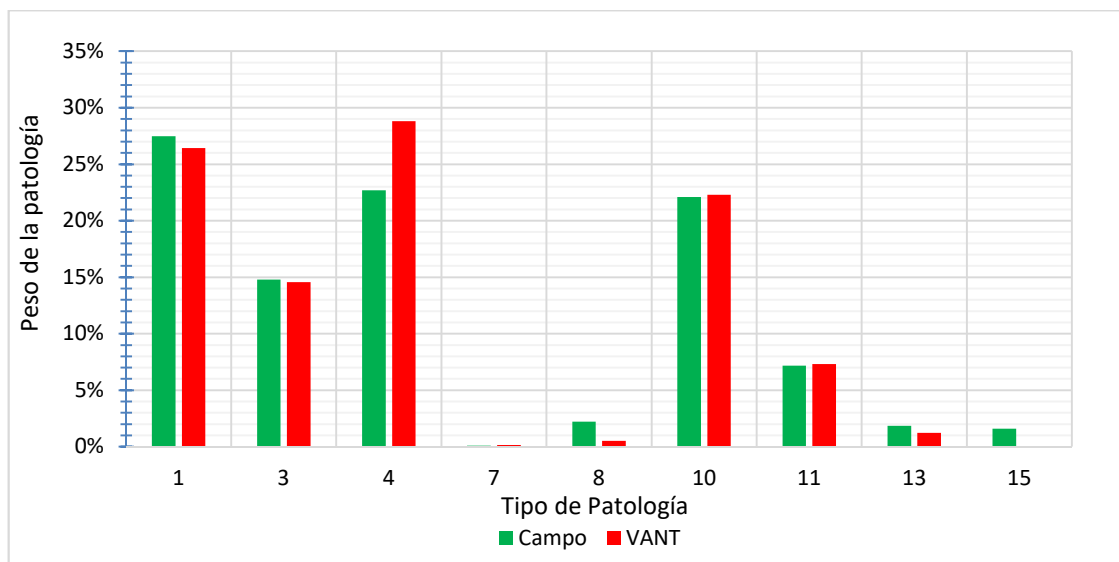


Figura 8.7: Peso por patologías en la afectación total, sumando los tipos de severidad PCI

Nota: Elaborado por el autor.

De acuerdo con la gráfica de la figura 8.7 se observa que, sumando las severidades, la incidencia de cada patología en la afectación total muestra una similitud en los dos procedimientos, aún mayor que la mostrada discriminando la severidad de cada patología.

8.5.8 Comparación y análisis VIZIR

En la tabla 23, se presentan los resultados del Índice de Deterioro Superficial “IS”, obtenido por el método VIZIR en cada unidad de muestreo con la información levantada por los procedimientos de inspección visual en campo y por medio de inspección visual sobre imágenes georreferenciadas obtenidas con el VANT DJI Phantom 4.

Tabla 23. Comparación IS Método Vizir.

Unidad de muestreo - Localización		LEVANTAMIENTO EN CAMPO					LEVANTAMIENTO SOBRE IMÁGENES VANT					DIFERENCIA
		IF	ID	IS	IS Final	Categoría	IF	ID	IS	IS Final	Categoría	
1	K0+000 - K0+40	-	-	1	1	BUENA	-	-	1	1	BUENA	-
2	K0+40 - K0+80	-	-	1	1	BUENA	-	-	1	1	BUENA	-
3	K0+80 - K0+120	2	-	2	2	BUENA	1	-	2	2	BUENA	-
4	K0+120 - K0+160	1	-	2	2	BUENA	-	-	1	1	BUENA	1
5	K0+160 - K0+200	-	-	1	1	BUENA	-	-	1	1	BUENA	-
6	K0+200 - K0+240	1	-	2	2	BUENA	1	-	2	2	BUENA	-
7	K0+240 - K0+280	4	1	5	5	DEFICIENTE	4	1	5	5	DEFICIENTE	-
8	K0+280 - K0+320	4	-	4	4	MARGINAL	4	-	4	4	MARGINAL	-
9	K0+320 - K0+360	4	1	5	5	DEFICIENTE	4	1	5	5	DEFICIENTE	-
10	K0+360 - K0+400	3	-	3	4	MARGINAL	3	-	3	4	MARGINAL	-
11	K0+400 - K0+440	2	2	3	3	MARGINAL	3	-	3	3	MARGINAL	-
12	K0+440 - K0+480	1	-	2	2	BUENA	2	-	2	2	BUENA	-
13	K0+480 - K0+520	3	1	4	4	MARGINAL	3	1	4	4	MARGINAL	-
14	K0+520 - K0+560	2	2	3	3	MARGINAL	1	2	3	3	MARGINAL	-
15	K0+560 - K0+600	2	3	5	5	DEFICIENTE	2	1	3	3	MARGINAL	2

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

Unidad de muestreo - Localización		LEVANTAMIENTO EN CAMPO					LEVANTAMIENTO SOBRE IMÁGENES VANT					DIFERENCIA
		IF	ID	IS	IS Final	Categoría	IF	ID	IS	IS Final	Categoría	
16	K0+600 - K0+640	2	1	3	3	MARGINAL	2	1	3	3	MARGINAL	-
17	K0+640 - K0+680	2	3	5	5	DEFICIENTE	3	2	4	4	MARGINAL	1
18	K0+680 - K0+720	3	1	4	4	MARGINAL	3	2	4	4	MARGINAL	-
19	K0+720 - K0+760	4	4	7	7	DEFICIENTE	4	4	7	7	DEFICIENTE	-
20	K0+760 - K0+800	4	4	7	7	DEFICIENTE	4	5	7	7	DEFICIENTE	-
21	K0+800 - K0+840	3	2	4	4	MARGINAL	3	2	4	4	MARGINAL	-
22	K0+840 - K0+880	2	-	2	2	BUENA	1	3	5	3	MARGINAL	1
23	K0+880 - K0+920	3	-	3	3	MARGINAL	2	1	3	3	MARGINAL	-
24	K0+920 - K0+960	2	-	2	2	BUENA	3	-	3	3	MARGINAL	1
25	K0+960 - K0+1000	2	2	3	3	MARGINAL	2	2	3	3	MARGINAL	-
IS Promedio		3.36					3.28					0.08

Nota: Elaborada por el autor

En la gráfica de la figura 8.8, se muestra la comparación del IS final obtenido en los dos procedimientos:

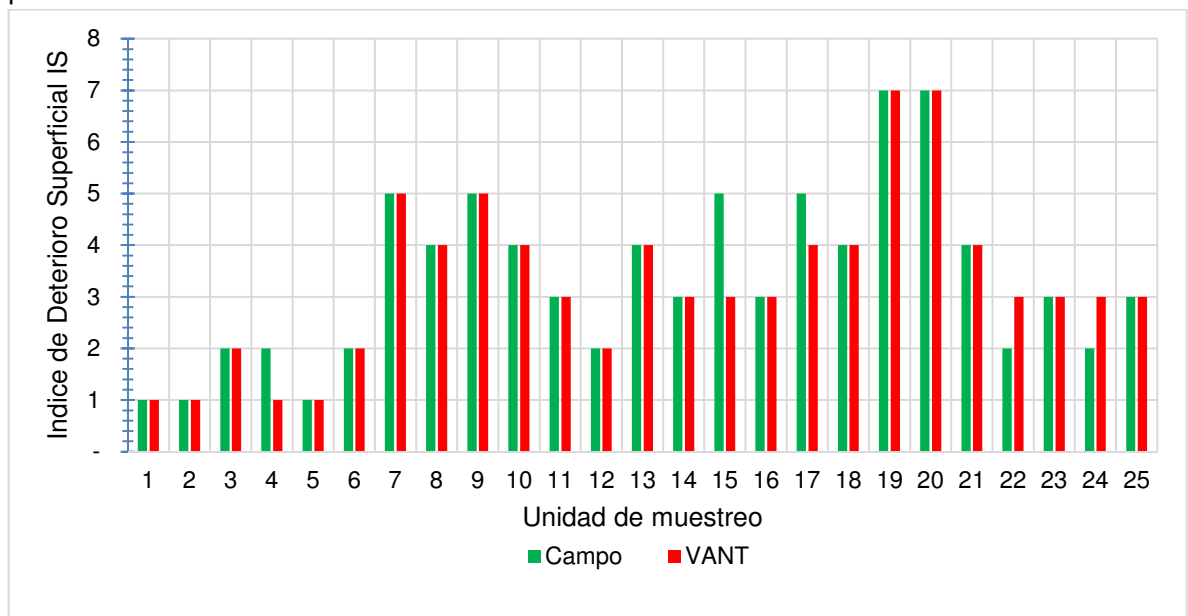


Figura 8.8: Comparación IS final metodología VIZIR

Nota: Elaborado por el autor.

En la gráfica de la figura 8.9, se muestra la comparación del Índice de Fisuración IF obtenido en los dos procedimientos:

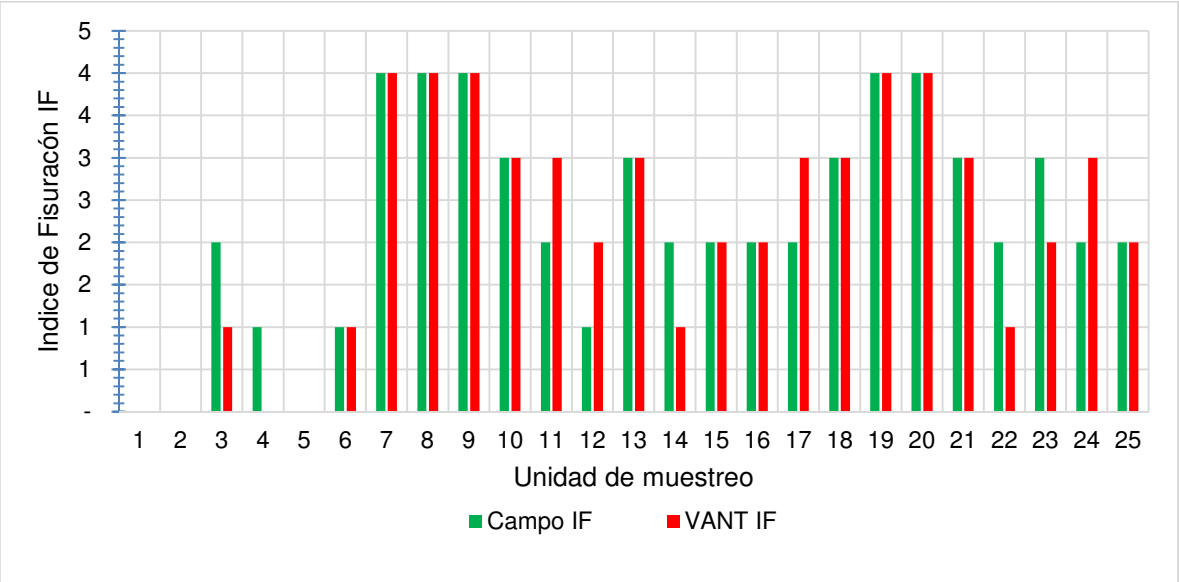


Figura 8.9: Comparación IS final metodología VIZIR

Nota: Elaborado por el autor.

En la gráfica de la figura 8.10, se muestra la comparación del Índice de Deformación ID, obtenido en los dos procedimientos:

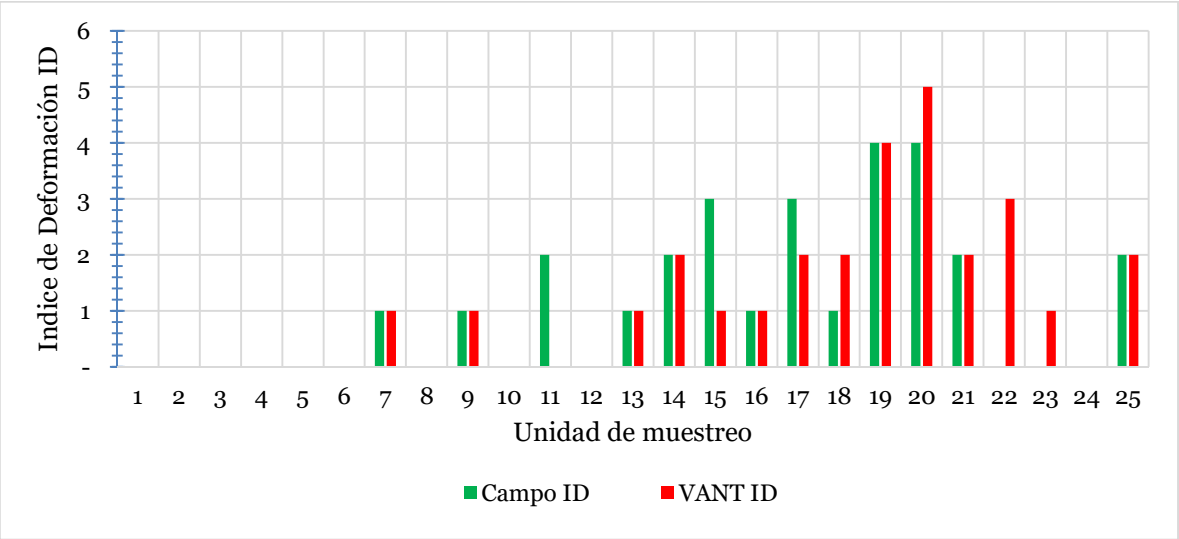


Figura 8.10: Comparación Índice de Deformación ID, metodología VIZIR

Nota: Elaborado por el autor.

En la tabla 24, se muestra la comparación del peso que tiene cada patología de acuerdo con las áreas afectadas:

Tabla 24. Peso de cada patología de acuerdo con el área afectada, metodología VIZIR

PATOLOGÍA	ID	LEVANTAMIENTO EN SITIO			LEVANTAMIENTO SOBRE IMAGENES VANT			DIF.
		Área Total m2		6396	Área Total m2		6396	
		Área Afectada	% de Afectación	% Peso	Área afectada	% de Afectación	% Peso	
Piel de Cocodrilo	1	517.750	8.09%	27.5%	498.510	7.79%	26.1%	0.30%
Grietas en Bloque	3	278.750	4.36%	14.8%	274.825	4.30%	14.4%	0.06%
Abultamiento o Hundimientos	4	428.000	6.69%	22.7%	543.280	8.49%	28.4%	-1.80%
Grietas de Borde	7	1.800	0.03%	0.1%	3.000	0.05%	0.2%	-0.02%
Grietas de reflexión de junta	8	42.000	0.66%	2.2%	10.000	0.16%	0.5%	0.50%
Grietas Transversales y Longitudinales	10	416.500	6.51%	22.1%	420.300	6.57%	22.0%	-0.06%
Parcheo	11	135.300	2.12%	7.2%	137.990	2.16%	7.2%	-0.04%
Huecos	13	35.030	0.55%	1.9%	22.900	0.36%	1.2%	0.19%
Ahuellamiento	15	30.000	0.47%	1.6%	0.000	0.00%	0.0%	0.47%
TOTALES		1885.13			1910.805			

Nota: Elaborada por el autor

La gráfica de la figura 8.11, nos muestra la comparación de áreas afectadas por cada tipo de patología:

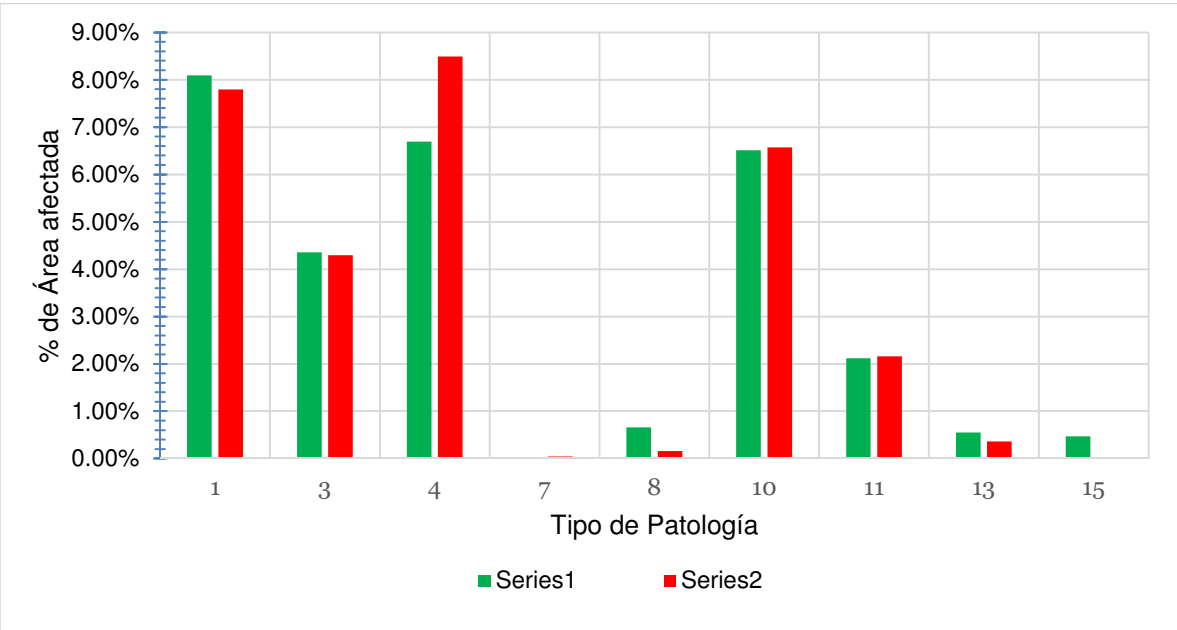


Figura 8.11: Comparación de áreas afectadas, metodología VIZIR

Nota: Elaborado por el autor

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

La gráfica de la figura 8.12, nos muestra la comparación del peso de cada patología en las áreas afectadas:

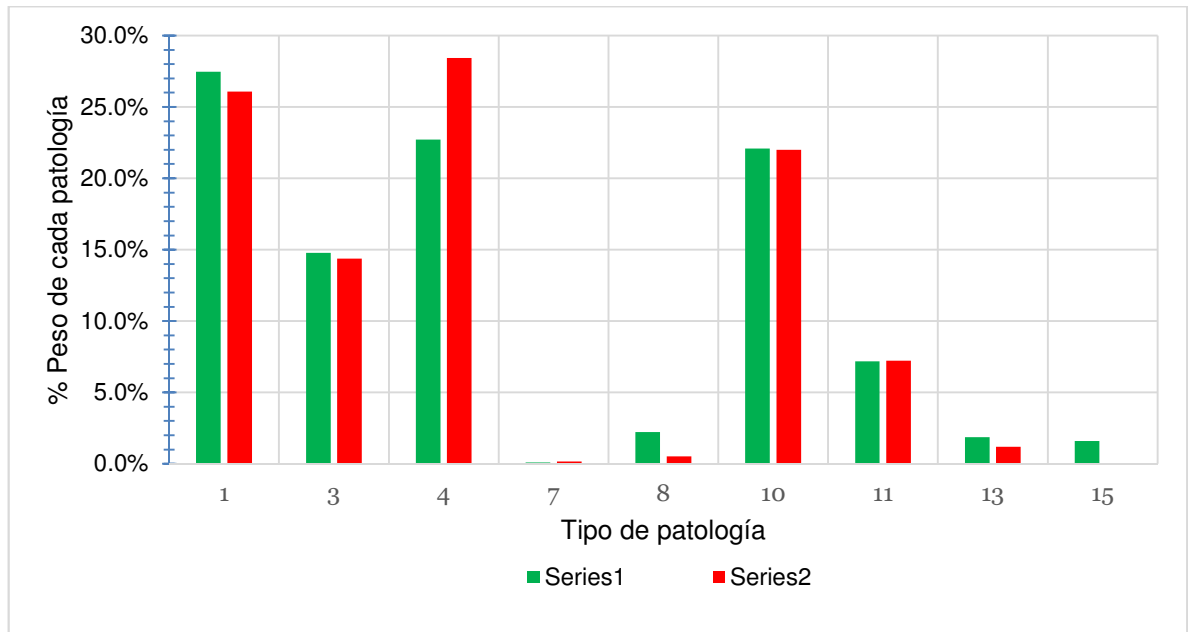


Figura 8.12: Comparación de peso de cada patología en las áreas afectadas, metodología VIZIR
Nota: Elaborado por el autor.

Las tablas y gráficas presentadas nos muestran registros similares de patologías obtenidas por los dos procedimientos y consecuentemente los resultados del Índice de deterioro superficial final es similar para el tramo vial.

Para el Índice de Deterioro Superficial (IS), vemos que en gran parte de las unidades de muestreo es igual, con excepción de las unidades 4, 17, 22 y 24 donde existe una diferencia de 1 y en la unidad 15, donde diferencia es de 2. Estas diferencias se deben principalmente a que, en las imágenes tomadas con el VANT, no se aprecian claramente algunas patologías del grupo A de tipo estructural, que tienen un peso importante en el cálculo del IS final, tal como ahuellamientos o hundimientos, debido a que estas patologías tienen un componente vertical, que no es posible apreciarlo en una imagen ortogonal a la superficie.

No obstante, el resultado del IS final promedio para el tramo vial en estudio, es muy cercano en su valor con una diferencia de apenas 0.08, lo que nos da como resultado para el tramo vial la misma categoría del IS y que es MARGINAL, con los dos procedimientos.

Analizando en detalle los Índices de Fisuración IF y Deformación ID, vemos que en el caso de la fisuración la similitud se da en todas las unidades de muestreo, siendo en la mayoría igual, mientras que, en el Índice de Deformación, existen unidades de muestro donde no se tienen este índice, debido que no se observaron patologías de tipo estructural o fueron

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

clasificadas en otro grupo de patologías. Igualmente, a nivel general los resultados promedio son muy similares, con pequeñas diferencias en cada índice obtenido por los dos procedimientos.

En términos generales se evidencia que el Índice de Deterioro Superficial IS, obtenido con la metodología VIZIR a partir de los procedimientos de inspección visual en campo y de inspección visual sobre imágenes VANT, es comparable y esto indica que el uso de imágenes georreferenciadas tomadas con el VANT DJI Phantom 4, para la inspección del pavimento, proporciona resultados satisfactorios.

9. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de esta investigación se pueden concluir los siguientes aspectos:

- Se evaluó del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales que presenta los pavimentos flexibles.
- Se obtuvo la condición de deterioro del pavimento en un tramo vial de prueba donde se realizó el estudio, mediante imágenes tomadas con un VANT DJI Phantom 4, con las metodologías VIZIR y PCI
- Se obtuvo la condición de deterioro del pavimento en el tramo vial de prueba donde se realizó el estudio, mediante el procedimiento convencional de auscultación visual in situ, con de las metodologías VIZIR y PCI.
- Se realizó la comparación de los resultados obtenidos de la condición de deterioro del pavimento, mediante el procedimiento convencional de auscultación visual in situ y utilizando imágenes tomadas con un VANT DJI Phantom 4.

De acuerdo con lo anterior se cumplieron los objetivos generales y específicos planteados para la investigación.

El registro de patologías se realizó con las metodologías PCI y VIZIR, y de acuerdo con la información tomada en campo por medio de inspección visual y en oficina por medio de inspección visual sobre imágenes tomadas con el VANT DJI Phantom 4, se puede afirmar que en términos generales los registros muestran similitud en la identificación de dpatologías y en las medidas de los mismos.

Respecto a los resultados obtenidos en el cálculo del Índice de Condición del pavimento (metodología PCI) y del Índice de Deterioro Superficial IS (metodología VIZIR), igualmente se observa una similitud en los dos procedimientos.

La investigación arrojó resultados favorables para la implementación como método alternativo del uso de Drones o VANT, con el fin de tomar imágenes georreferenciadas de alta resolución y utilizarlas para registrar patologías del pavimento en un tramo vial. Con esto se evidencia que los resultados esperados de la investigación y descritos en el anteproyecto son positivos.

10. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones, se recomienda hacer la toma de imágenes con un VANT, sobre losas de concreto para registrar patologías de pavimentos rígidos.

Uno de los productos que se obtiene al procesar las imágenes georreferenciadas tomadas con un VANT, es un modelo digital de terreno (DTM), se recomienda investigar sobre el uso que se le puede dar a este DTM para obtener el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), dado la importancia que este parámetro tiene en la medición de la calidad de un pavimento en un tramo vial.

Se recomienda hacer tomas de imágenes con cámaras de resoluciones superiores a la usada para esa investigación. En este sentido es importante tener un panorama más amplio de los equipos adecuado con costos razonables.

Se recomienda profundizar en el desarrollo de software para registrar de manera automática sobre imágenes georreferenciadas, las patologías de un pavimento en un tramo vial dado.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Alkosto Tienda Online. Drone DJI Phantom 4 Pro/Cámara. <https://www.alkosto.com/drone-dji-phantom-4-pro-camara-1>
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) <https://www.asprs.org/organization/what-is-asprs.htm>.
- Association mondiale de la Route (2014). *Importance de L'Entretien Routier*. <https://www.piarc.org/es/login.members.confirm.htm?back=/ressources/publications/8/22261,2014R02FR.pdf>.
- ASTM D6433-18, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- Attoh-Okine, N., & Adarkwa, O., (2013). *Pavement Condition Surveys – Overview of Current Practices*. USA: Delaware Center for Transportation. University of Delaware.
- Saad A.M. y Tahar K. N. (2019). Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV)", *Measurement*, vol. 137, pp. 647-654, 2019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.093>.
- Berrío Correa, L. A. y Ussa Caicedo A. C., (2012). *Auscultación de pavimentos mediante interpretación de imágenes*. Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada.
- Bolívar Palomo, S. A. y Quintero Castiblanco, C. E. (2019). *Análisis del estado de las vías secundarias en Colombia y la oportunidad de la ingeniería civil para su construcción y mantenimiento*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Cámara de Comercio de Bogotá, Universidad de Los Andes, (2019). Observatorio de movilidad, Boletín de mantenimiento vial movilidad No.3 ISSN. 2027-1026.
- Cárdenas Lemus, D., Holguín Rojas, O. y Zabala Muñoz, S., (2019). *Auscultación visual realizada mediante el drone DJI Phantom 4 pro, con implementación de metodologías Vizir y PCI para pavimentos flexibles en la carrera 69b sur entre la avenida primera de mayo y calle 9 a sur – barrio Villa Claudia - ciudad Bogotá*. Bogotá: Universidad Piloto.
- Cardona Díaz C.A. y Prieto Mendoza, S. R., (2014). *Comparación metodologías Invias y metodología Mexicana (Instituto Mexicano Sedesol) para evaluación de condición superficial de estructuras de pavimento*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Cardoso Parente, D., Carvalho Felix, N. y Pessoa Picanço A., (2017). *Uso de vehículo aéreo no tripulado (VANT) en la identificación de falla superficial en pavimento asfáltico*. Revista ALCONPAT, 7 (2), pp. 160-171, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.161>.
- Cerón Bermúdez, V. G. (2006). *Evaluación y comparación de metodologías VIZIR y PCI sobre el tramo de vía en pavimento flexible y rígido de la vía: Museo Quimbaya-CRQ Armenia Quindío (PR 00+000-PR 02+600)*. Colombia. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. Documento CONPES 3857 (2016). *Lineamientos de política para la gestión de la red terciaria*. República de Colombia Departamento Nacional de Planeación.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

- Consejo Nacional de Política Económica y Social. Documento CONPES 3272 (2004). *Política integral de infraestructura vial*. República de Colombia Departamento Nacional de Planeación.
- Cruz Arias, C. A. Y Palacios Ramírez, E., E. (2012). *Implementación de un modelo de gestión vial en algunos tramos de vía para el mantenimiento y recuperación de la malla vial en casco urbano del municipio de la Estrella*. Colombia. Medellín: Universidad de Medellín.
- Cruz Toribio, J. O., Gutiérrez Lazares, J. W. *Evaluación superficial de vías urbanas empleando vehículo aéreo no tripulado (VANT). Pavement surface evaluation of urban roads using an unmanned aerial vehicle (UAV)*. Revista Métodos & Materiales, Publicación Anual • Volumen 8 • diciembre 2018 • ISSN electrónico: 2215-4558.
- DJI Phantom 4 Pro/Pro+ V2.0. <https://www.dji.com/phantom-4-pro-v2>.
- Díaz Cárdenas, J. M. (2014). *Evaluación de la metodología PCI, para la toma de decisiones en las intervenciones realizadas en los pavimentos flexibles*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Dynatest Colombia S.A.S., (2020). *Equipo multifuncional de inspección automatizada MFV*. www.dynatest.com
- El Deterioro de Los Caminos en los Países en Desarrollo, Causas y Soluciones*. Estudio de Políticas del Banco Mundial. Washington DC ,1988.
- European Aviation Safety Agency (EASA). 2020. <https://www.easa.europa.eu>
- Gomes Bezerra, A. R., Borba Pedroza, G., (2019). *Utilização de veículo aéreo não tripulado para, & identificação de patologia na rodovia Go-319*. Goiana, Brasil: Centro Universitário de Goiás Uni-Anhanguera.
- Gopalakrishnan, K., Gholami H., Vidyadharan A., Choudhary, A. y Agrawal, A. (2017). *Crack damage detection in unmanned aerial vehicle images of civil infrastructure using pre-trained deep learning model*. International Journal for Traffic and Transport Engineering, 2018, 8(1): 1 – 14. Doi: [http://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2018.8\(1\).0](http://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2018.8(1).0).
- Grandsaert, P. J., (2015). Integrating Pavement Crack Detection and Analysis Using Autonomous Unmanned Aerial Vehicle Imagery). Theses and Dissertations. 147. <https://scholar.afit.edu/etd/147>. AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Air Force Base, Ohio, USA.
- Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. Instituto Nacional de Vías INVIAS 2008.
- Heggie I. G. & Vickers, P. (1998). *Commercial Management and Financing of Roads*. Washington DC. Work Bank Technical Paper No. 409.
- Herrera Maldonado, J. A., y Serna Galeano, I. A. F., (2017). *Metodología para la detección de huecos o baches en vías terciarias urbanas a partir de imágenes de alta resolución espacial, usando técnicas de geobia y lógica difusa*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). *Administración Geomática*. <https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/administracion-geomatica>.

- Kelly, G., Delaney, D. Chai, G. y Mohamed, S. (2014). *Optimizing local council's return on investment from annual pavement rehabilitation budgets through targeting of the average pavement condition index*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) 2016; 3 (5): 465-474. doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.008.
- LCPC1. *VIZIR, méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins de entretien d'un réseau routier*. Paris décembre 1991.
- Leguizamón M. P. M. (2007). *Instructivo para la inspección visual y la evaluación de los deterioros de los pavimentos asfálticos en carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- Ponniiah, J., Sharma, B. N, Kazmierowski, T. J. (2001). *A Critical Review of an Existing Pavement Condition Rating System*. Ontario, Canada. Pavements and Foundations Section Ministry of Transportation, Ontario. *A paper offered for 5th international conference on managing pavements August 11-14, University of Washington (Seattle Washington USA)*.
- Puche Aguisaca P. A. y Zárate Torres B. A., (2020). *Evaluación superficial de pavimentos rígidos en carreteras mediante ortoimágenes obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado*. Ecuador, Universidad Técnica Particular de Loja.
- Quintero, J. R., (2011). *Inventarios viales y categorización de la red vial en estudios de ingeniería de tránsito y transporte*. Colombia. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnología de Colombia, Revista Facultad de Ingeniería, 20(30), 65-77.
- Ríos Marín, J. G. y Martínez Arias, I. D., (2007). *Sistema de administración de pavimentos sobre la ciudad de Bogotá*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Salomón, D. (2006). *Conservación de Pavimentos: Metodología y Estrategias*. Boise, ID USA: Pavement Preservation Systems, L.L.C.
- Sánchez Morales, M. C., Martínez Rojo T. E., Tejada Piusseaut, E., (2018). *Medición de la regularidad superficial en pavimentos a partir de método fotogramétrico digital de corto alcance. Measurement of road roughness by close range digital photogrammetry method*. Ecuador. Segunda Convención Científica Internacional de La Universidad Técnica de Manabí.
- Sierra Díaz, C. C. y Rivas Quintero, A. F., (2016). *Aplicación y comparación de las diferentes metodologías de diagnóstico para la conservación y mantenimiento del tramo PR 00+000 – PR 01+020 de la vía al llano (dg 78 bis sur – calle 84 sur) en la UPZ Yomasa*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Solminihaç, H., Echaveguren, T., Chamorro, A. (2018). *Gestión de Infraestructura Vial*. Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile. ISBN: 978-956-14-2275-9. doi:10.2307/j.ctvkjb4dw.
- Tan, Y., & Li, Y., (2019). *UAV photogrammetry-based 3D road distress detection*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 8(9), 409. Doi:10.3390/ijgi8090409.
- TU EQUIPO SAS (2020). *Solución multifuncional de monitoreos de carreteras de alto rendimiento spider*. www.tuequipo.com.co
- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil). *Resolución 4201 de 2018*. <https://skyfly.com.co/normatividad-drones-colombia-2019/>.

Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento

- Vargas Buitrago, C. A. (2018). *Análisis comparativo de la inspección visual de un pavimento flexible, por los métodos tradicional y por sensores remotos en un kilómetro de la calle séptima en el municipio de Cajicá Cundinamarca*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Vásconez, N. L., & Sevilla, H. C. (2018). *Uso de los sensores remotos en mediciones forestales*. European Scientific Journal May 2018 edition Vol.14, No.15 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 743. doi:10.19044/esj.2018.v14n15p58
- Vásquez Varela, L. R., (2002). *Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras*. Colombia. Manizales: Ingepav.
- Vieira, S. A., Júnior, A. A. E. P., Oliveira, F. H. L., y Aguiar, M. F. P. *Análise comparativa de metodologias de avaliação de pavimentos por meio do IGG e PCI*. In: Conex. Ci. e Tecnol. Fortaleza, Ceará. v. 10, n. 3, p. 20 – 30, nov. 2016.
- Yepes, T., Ramirez J. M., Villar, L., (2013). *Infraestructura de transporte en Colombia*. Bogotá: Centro de Investigación Económica y Social FEDESARROLLO.
- Zamora Fandiño, N., Barrera Reyes, O. L., (2012). *Diagnóstico de la infraestructura vial actual en Colombia*. Bogotá: Universidad EAN.

12. ANEXOS

A – Registro de patologías del pavimento tomados a lo largo de la vía, por medio de inspección visual.

B – Registro de patologías del pavimento obtenidas en equipo de cómputo de las imágenes tomadas con el VANT, a lo largo de la vía.

C –Cálculos para obtener el índice de condición del pavimento (PCI), a partir del inventario de patologías del pavimento, realizado en campo a lo largo de la vía por medio de inspección visual.

D – Cálculos para obtener el índice de deterioro superficial (IS), a partir del inventario de patologías del pavimento, realizado en campo a lo largo de la vía por medio de inspección visual.

E – Cálculos para obtener el índice de condición del pavimento (PCI), a partir del registro de patologías de pavimento realizado en equipo de cómputo, sobre las imágenes tomadas con el VANT, a lo largo de la vía.

F – Cálculos para obtener el índice de deterioro superficial (IS), a partir del registro de patologías del pavimento realizado en equipo de cómputo sobre las imágenes tomadas con el VANT, a lo largo de la vía.

G – Curvas para valores deducidos en pavimentos asfálticos para cálculo de PCI ASTM d6433-18.

H – Esquemas del registro de patologías de pavimento, observadas sobre imágenes tomadas con VANT DJI PHANTOM 4.