



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL
PAVIMENTO (PCI) MEDIANTE MÉTODOS TRADICIONALES Y
TECNOLOGIA DE DRONES EN VÍAS URBANAS

ARMIJOS PUGLLA JUNIOR VICENTE
INGENIERO CIVIL

MACHALA
2025



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN
DEL PAVIMENTO (PCI) MEDIANTE MÉTODOS
TRADICIONALES Y TECNOLOGIA DE DRONES EN VÍAS
URBANAS**

**ARMIJOS PUGLLA JUNIOR VICENTE
INGENIERO CIVIL**

**MACHALA
2025**



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTOS TÉCNICOS

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN
DEL PAVIMENTO (PCI) MEDIANTE MÉTODOS
TRADICIONALES Y TECNOLOGIA DE DRONES EN VÍAS
URBANAS**

**ARMIJOS PUGLLA JUNIOR VICENTE
INGENIERO CIVIL**

SANCHEZ MENDIETA CARLOS EUGENIO

**MACHALA
2025**

TESIS FINAL_ ARMIJOS JUNIOR

4%
Textos
sospechosos

4% Similitudes

0% similitudes entre comillas (ignorado)

< 1% entre las fuentes mencionadas (ignorado)

0% Idiomas no reconocidos (ignorado)

Nombre del documento: TESIS FINAL_ ARMIJOS JUNIOR.docx	Depositante: Sanchez Mendieta Carlos Eugenio	Número de palabras: 13.180
ID del documento: 72d4243002873061a9076edd1774a22641f29b3b	Fecha de depósito: 14/8/2025	Número de caracteres: 89.602
Tamaño del documento original: 17,44 MB	Tipo de carga: interface	
	fecha de fin de análisis: 14/8/2025	

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	hdl.handle.net Diagnóstico y evaluación del pavimento de la vía principal de la ... http://hdl.handle.net/10656/7123 32 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (101 palabras)
2	docslib.org Pdot-Canton-Camilo-Ponce - DocsLib https://docslib.org/doc/10081151/pdot-canton-camilo-ponce	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (93 palabras)
3	hdl.handle.net Evaluación y análisis del estado de conservación del pavimento ... https://hdl.handle.net/20.500.12759/6552 13 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (95 palabras)
4	1library.co Índice de Condición del Pavimento PCI - BASES TEÓRICAS https://1library.co/article/indice-condición-pavimento-pci-bases-teóricas.z3d5mwp7 13 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (86 palabras)
5	hdl.handle.net ¿Cuestión de método? sobre los cursos remediales universitario... https://hdl.handle.net/10669/23324 14 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (43 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	dx.doi.org Evaluación Superficial de Vías Urbanas empleando Vehículo Aéreo N... http://dx.doi.org/10.15517/mym.v8i1.34113	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (36 palabras)
2	hdl.handle.net Cálculo del índice de condición del pavimento (PCI) Barranco - S... https://hdl.handle.net/20.500.14138/2399	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)
3	repositorio.urp.edu.pe Parámetros de mantenimiento para incrementar la pro... https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/9194	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (36 palabras)
4	Documento de otro usuario #55f8d4 Viene de de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (38 palabras)
5	Documento de otro usuario #1df72b Viene de de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)

Fuentes ignoradas

Estas fuentes han sido retiradas del cálculo del porcentaje de similitud por el propietario del documento.

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	8.- CAPITULO 2.docx 8.- CAPITULO 2 #fa8f79 Viene de de mi biblioteca	25%		Palabras idénticas: 25% (3339 palabras)
2	TESIS TITLACION CALLE BARREIRO.docx TESIS TITLACION CALLE BARR... #4292e2 Viene de de mi grupo	1%		Palabras idénticas: 1% (161 palabras)
3	TESIS TITLACION CALLE BARREIRO.docx TESIS TITLACION CALLE BARR... #50b481 Viene de de mi grupo	1%		Palabras idénticas: 1% (161 palabras)
4	Documento de otro usuario #b2c3e4 Viene de de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (88 palabras)
5	doi.org https://doi.org/10.18196/st.v28i1.25170	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (60 palabras)
6	dominiodelasciencias.com https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/4093	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (56 palabras)
7	Documento de otro usuario #4c1534 Viene de de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (56 palabras)

N°	Descripciones		Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
8		Documento de otro usuario #2a69c5 📌 Viene de de otro grupo	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (44 palabras)
9		www.mdpi.com Proposal of an Integrated Method of Unmanned Aerial Vehicle ... https://www.mdpi.com/2071-1050/17/7/3180#:~:text=The method follows three key steps: fir...	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (35 palabras)
10		doi.org Proposal of an Integrated Method of Unmanned Aerial Vehicle and Artifi... https://doi.org/10.3390/su17073180	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (35 palabras)
11		doi.org ROADS—Rover for Bituminous Pavement Distress Survey: An Unmanne... https://doi.org/10.3390/s22093414	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (32 palabras)
12		doi.org Towards Low-Cost Pavement Condition Health Monitoring and Analysis ... https://doi.org/10.3390/app10010319	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (27 palabras)
13		doi.org Applications of Terrestrial Laser Scanner in Detecting Pavement Surface ... https://doi.org/10.3390/pr11051370	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)
14		www.mdpi.com Applications of Terrestrial Laser Scanner in Detecting Pavemen... https://www.mdpi.com/2227-9717/11/5/1370	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)
15		doi.org Evaluación Superficial de Vías Urbanas empleando Vehículo Aéreo No Tr... https://doi.org/10.15517/mym.v8i1.34113	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (24 palabras)
16		Documento de otro usuario #3bd857 📌 Viene de de otro grupo	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (24 palabras)
17		doi.org Pavement Crack Detection from Mobile Laser Scanning Point Clouds Usi... https://doi.org/10.3390/s20154198	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (24 palabras)
18		doi.org Using UAV Based 3D Modelling to Provide Smart Monitoring of Road Pav... https://doi.org/10.3390/info11120568	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (22 palabras)
19		doi.org Topographic and geodetic support for assessing the technical condition ... https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-350-358	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (21 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1		https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100168
2		https://doi.org/10.30880/ijscet.2023.14.01.024
3		https://doi.org/10.21105/joss.03172
4		https://doi.org/10.1007/s41062-023-01315-2
5		https://doi.org/10.31979/mti.2023.2202

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

El que suscribe, **ARMIJOS PUGLLA JUNIOR VICENTE**, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado **EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI) MEDIANTE MÉTODOS TRADICIONALES Y TECNOLOGIA DE DRONES EN VÍAS URBANAS**, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

El autor como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



ARMIJOS PUGLLA JUNIOR VICENTE
1104877848

DEDICATORIA

A Dios,

Por ser mi refugio y fortaleza en los momentos más difíciles, por escucharme, darme la sabiduría y el valor para seguir adelante. En Ti deposité mi confianza, y con Tu guía, cada obstáculo se convirtió en una lección.

A mi mamá, Fanny Puglla,

Por ser el corazón de nuestra familia, por su lucha incansable y su amor incondicional. Sus consejos, su paciencia y su ejemplo de resistencia han sido mi faro en los días de incertidumbre. Este logro no es solo mío, sino también suyo, porque cada paso que di fue impulsado por su apoyo y su fe en mí. Eres mi mayor inspiración, y hoy, al culminar esta etapa, sé que es el resultado de tu sacrificio y tu amor inagotable.

AGRADECIMIENTO

Doy gracias primero a Dios, por ser mi fortaleza y guía en cada etapa de este proceso. Por darme la perseverancia para continuar cuando las dificultades parecían insuperables, y por bendecirme con la sabiduría necesaria para completar este logro académico.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi familia, cuyo apoyo incondicional fue fundamental durante toda mi formación universitaria. En especial a mis hermanos, compañeros incondicionales que celebraron cada avance y me alentaron en los momentos desafiantes. Este título es el resultado de su apoyo constante.

Mi sincero reconocimiento al Ing. Carlos Sánchez Mendieta mi tutor de tesis, por compartir su valioso conocimiento y experiencia. Su orientación académica, paciencia y dedicación fueron determinantes para el éxito de este trabajo de investigación

Un agradecimiento muy especial a Nardy, quien llegó en la etapa final de mi carrera para convertirse en un apoyo fundamental. Su compañía, consejos y motivación en los momentos decisivos hicieron posible la culminación de este proyecto.

Resumen

Este estudio evaluó el Índice de Condición del Pavimento (PCI) en la calle Bella Rica, ubicada en el cantón Camilo Ponce Enríquez, Ecuador, comparando métodos tradicionales (inspección visual) con tecnología de drones. La investigación incluyó una revisión bibliográfica, evaluación in situ mediante el método PCI estándar, y levantamiento fotogramétrico con drones para generar ortomosaicos y modelos digitales de superficie (DSM). Los resultados mostraron una correlación significativa ($R^2 = 0.88$) entre ambos métodos, destacando que los drones detectaron un 18% más de microfisuras no identificadas visualmente. La vía presentó condiciones heterogéneas, con un 37% de tramos en estado "Excelente" ($PCI > 85$) y un 6.5% en estado crítico ("Pobre/Fallado", $PCI < 40$). Se concluye que la combinación de ambas metodologías optimiza la evaluación de pavimentos, especialmente en áreas extensas o de difícil acceso.

Palabras clave:

Índice de Condición del Pavimento (PCI), Drones (UAV), Fotogrametría, Evaluación de pavimentos

Abstract

This study evaluated the Pavement Condition Index (PCI) on Bella Rica Street, located in the canton of Camilo Ponce Enríquez, Ecuador, comparing traditional methods (visual inspection) with drone technology. The research included a literature review, on-site evaluation using the standard PCI method, and photogrammetric surveying with drones to generate orthomosaics and digital surface models (DSM). The results showed a significant correlation ($R^2 = 0.88$) between both methods, highlighting that drones detected 18% more micro-cracks not identified visually. The road exhibited heterogeneous conditions, with 37% of sections in "Excellent" condition ($PCI > 85$) and 6.5% in critical condition ("Poor/Failed," $PCI < 40$). It was concluded that combining both methodologies optimises pavement assessment, particularly in large or hard-to-access areas

Keywords:

Pavement Condition Index (PCI), Drones (UAV), Photogrammetry, Pavement assessment

ÍNDICE DE CONTENIDO

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO 1	12
1. Planteamiento del problema	12
1.1 Antecedentes.....	12
1.1.1 Ubicación.....	12
1.1.2 Datos de población	13
1.1.3 Topografía	13
1.1.4 Geología.....	13
1.1.5 Riesgos hidrológicos.....	15
1.1.6 Sistema vial.....	16
1.2 Descripción de la situación problemática	17
1.2.1 Descripción del problema.....	17
1.2.2 Árbol de problemas	18
.....	18
1.3 Formulación del problema: preguntas científicas	18
1.3.1 Problema central	18
1.3.2 Problemas secundarios	18
1.4 Delimitación del objeto de estudio	18
1.5 Justificación	19
1.6 Objetivos: General y específicos	21
1.6.1 Objetivo general	21
1.6.2 Objetivos específicos.....	21
CAPÍTULO II.....	22
2. Marco teórico.....	22
2.1 Antecedentes contextuales	22
2.1.1 Macro.....	22
2.1.2 Meso	23
2.1.3 Micro	25
2.2 Antecedentes conceptuales	26
2.2.1 Vías urbanas	26
2.2.2 Pavimentos.....	26
2.2.3 Índice de condición de pavimento (PCI)	26
2.2.4 Anomalías en los pavimentos asfálticos	26

2.2.5	Fotogrametría aérea	27
2.2.6	Vehículos aéreos no tripulados (Drones).....	27
2.2.7	Georreferenciación y puntos de control.....	28
2.2.8	Modelo digital de superficies (DSM)	28
2.2.9	Ortomosaicos	28
2.3	Antecedentes referenciales o históricos	28
CAPITULO III		31
3.	Metodología.....	31
3.1	Modalidad básica de investigación	31
3.2	Tipo de investigación.....	31
3.2.1	Investigación documental	31
3.2.2	Investigación de campo	31
3.2.3	Investigación analítica	32
3.3	Población y muestra.....	32
3.3.1	Población	32
3.3.2	Muestra	32
3.3.3	Unidades de muestreo.....	33
3.3.4	Intervalos de unidades de muestreo.....	34
3.4	Métodos teóricos y empíricos con los materiales utilizados.....	34
3.4.1	Método Índice de condición del pavimento PCI	35
3.4.2	Cálculo de PCI mediante la fotogrametría aérea	37
3.4.3	Planificación de vuelo	38
3.4.4	Procesamiento de imágenes.....	38
3.4.5	Identificación de fallas en el pavimento	38
CAPITULO IV		40
4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	40
4.1	Análisis e interpretación de resultados obtenidos mediante el método del PCI 40	
4.1.2	Fallas existentes vía Bella Rica	40
4.1.3	Resultados método PCI	41
4.2	Análisis e interpretación de resultados mediante UAV e Índices Espectrales: Determinación del Índice de Condición del Pavimento (PCI)	42
4.2.1	Procesamiento de Índices Espectrales en QGIS	45
4.2.2	Umbralización y Clasificación de Fallas	46
4.2.3	Cálculo del Índice de Condición del Pavimento (PCI).....	51
5.	Discusión	52
5.1	Análisis técnico entre PCI UAV vs. PCI Inspección Tradicional	52
5.2	Interpretación de Resultados.....	54

5.3	Comparación con otras investigaciones.....	55
6.	Conclusiones.....	57
7.	Recomendaciones	59
8.	Bibliografía.....	60
9.	Anexos.....	63

INDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Proyección de población año 2024 Camilo Ponce Enríquez.....	13
Tabla 2:	Porcentaje por formación geológica de Camilo Ponce Enríquez.	15
Tabla 3:	Porcentaje de amenaza por inundaciones en Camilo Ponce Enríquez.	15
Tabla 4:	Tipos de vías del cantón Camilo Ponce Enríquez.	16
Tabla 5:	Longitudes de unidades de muestreo asfálticas.....	33
Tabla 6:	Proceso metodológico	34
Tabla 7:	Clasificación del pavimento por PCI	37
Tabla 8:	Datos zona de estudio.....	40
Tabla 9:	Resultados método PCI	41
Tabla 10:	Resultados fotogrametría PCI	52
Tabla 11:	Resultados PCI	53
Tabla 12:	valores estadísticos.....	55

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1:	Ubicación geográfica Camilo Ponce Enríquez.....	1
Ilustración 2:	Geología del Cantón Camilo Ponce Enríquez.	14
Ilustración 3:	Árbol de problemas.....	18
Ilustración 4:	Delimitación de zona de estudio.....	19
Ilustración 5:	Ficha técnica de fallas PCI	36
Ilustración 6:	Fallas existentes vía Bella Rica	41
Ilustración 7:	Clasificación de la vía método PCI	42
Ilustración 8:	Diagrama de flujo de adquisición de ortomosaico mediante UAV	44
Ilustración 9:	Ortofoto y Modelo Digital de Superficies (DSM) correspondientes a la zona de estudio	44
Ilustración 10:	Ortofoto y Modelo Digital de Superficies (DSM) correspondientes a la zona de estudio	44
Ilustración 11:	Índices CDI y PDI para la evaluación de pavimentos.....	46
Ilustración 12:	Comparación Índices espectrales tramo 1.	47
Ilustración 13:	Comparación Índices espectrales tramo 2	47
Ilustración 14:	Comparación Índices espectrales tramo 3	48
Ilustración 15:	Comparación Índices espectrales tramo 4	48
Ilustración 16:	Comparación Índices espectrales tramo 5	49
Ilustración 17:	Comparación Índices espectrales tramo 6	49

Ilustración 18: Comparación Índices espectrales tramo 7	50
Ilustración 19: Comparación Índices espectrales tramo 8	51

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Unidades de muestreo.....	33
Ecuación 2: Número mínimo de unidades de muestreo	33
Ecuación 3: Intervalos de unidades de muestreo.....	34
Ecuación 4: Calificación tramo PCI	36

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1:Ficha técnica tramo 1	63
Anexo 2:Ficha técnica tramo 2.....	64
Anexo 3: Ficha técnica tramo 3.....	65
Anexo 4: Ficha técnica tramo 4.....	66
Anexo 5: Ficha técnica tramo 5.....	67
Anexo 6: Ficha técnica tramo 6.....	68
Anexo 7: Ficha técnica tramo 7.....	69
Anexo 8: Ficha técnica tramo 8.....	70
Anexo 9: Ficha técnica tramo 9.....	71
Anexo 10: Equitación dron.....	72
Anexo 11: Instalación RTK.....	72
Anexo 12:Plan de vuelo.....	72
Anexo 13: Puntos de control	72
Anexo 14: Descenso dron.....	72
Anexo 15:Supervisión y operación plan de vuelo	72

INTRODUCCIÓN

Importancia del tema

La evaluación de pavimentos en vías urbanas es fundamental para garantizar la movilidad, la seguridad y la sostenibilidad del transporte. El desgaste acelerado de las infraestructuras viales, causado por factores como el tránsito constante y la falta de mantenimiento adecuado, afecta la calidad de vida de las comunidades y aumenta los costos relacionados con el transporte. Tradicionalmente, el Índice de Condición del Pavimento (PCI) ha sido la herramienta estándar para evaluar el estado de las vías. Sin embargo, la incorporación de tecnologías emergentes, como los vehículos aéreos no tripulados (UAV), ha revolucionado este campo al ofrecer mayor precisión, eficiencia y capacidad de análisis mediante técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes y aprendizaje automatizado (Roberts, Giancontieri, et al., 2020; Wira et al., 2022).

Actualidad de la problemática

En el cantón de Camilo Ponce Enríquez, provincia de Azuay, las condiciones de las vías urbanas, como es el hecho de la calle Bella Rica, enfrentan un deterioro progresivo debido a la falta de mantenimiento adecuado y al intenso flujo de vehículos pesados y livianos. Estas vías abarcan una longitud total de 0,676 kilómetros y presentan una combinación de superficies asfaltadas y adoquinadas, son un claro ejemplo de los desafíos que enfrentan muchas localidades con recursos limitados y alta demanda de transporte. Este proyecto se centra en comparar los métodos tradicionales de evaluación del PCI con el uso de UAV, con el propósito de identificar el enfoque más eficiente, preciso y adaptable a las condiciones locales. La elección de una metodología adecuada no solo permitirá optimizar los recursos disponibles, sino también contribuirá a la planificación y ejecución de acciones de mantenimiento que mejoren la calidad de vida de los habitantes y la funcionalidad de la red vial urbana.

Estructura del trabajo

La estructura de este trabajo consta de cuatro capítulos. El primero presenta el planteamiento del problema, incluyendo antecedentes, descripción de la situación problemática, justificación y objetivos. El segundo capítulo desarrolla el marco teórico,

explorando conceptos clave como el Índice de condición del pavimento, anomalías en pavimentos asfálticos, vehículos aéreos no tripulados, además de identificar casos de estudio relevantes dentro y fuera del país. En el tercer capítulo se describe la metodología empleada en el trabajo de titulación, detallando los siguientes aspectos: la población y unidades de muestra seleccionadas, las técnicas específicas aplicadas, las fichas técnicas para la evaluación de pavimentos flexibles, el levantamiento de datos mediante drones y el procesamiento de la información recopilada. En el cuarto capítulo se presenta la sistematización de los datos obtenidos mediante las metodologías descritas en el capítulo anterior. Los resultados se organizan y analizan comparativamente, contrastando las dos metodologías empleadas con el objetivo de evaluar su eficiencia y precisión en la evaluación de pavimentos flexibles. Este análisis comparativo permite identificar el enfoque más viable, tanto en términos técnicos como operativos, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones en futuras evaluaciones de infraestructura vial.

CAPÍTULO 1

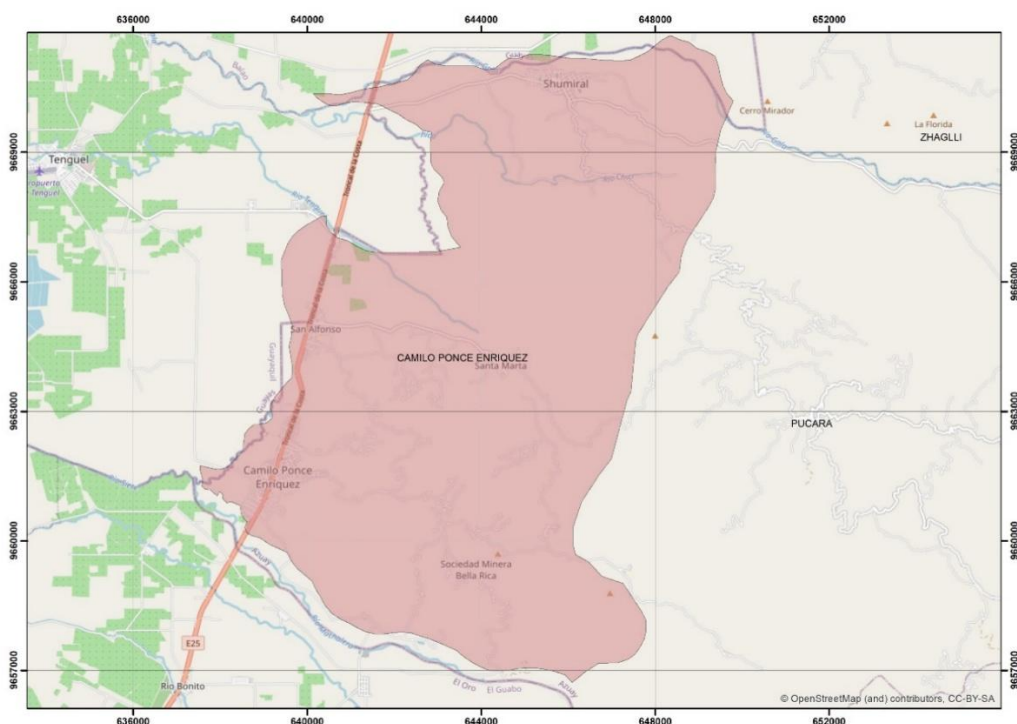
1. Planteamiento del problema

1.1 Antecedentes

1.1.1 Ubicación

El cantón Camilo Ponce Enríquez, ubicado en el oeste de la provincia de Azuay sobre la llanura costera, limita al norte con los cantones Cuenca y Naranjal; al sur con El Guabo y Pucará; al este con Santa Isabel y Cuenca; y al oeste con Guayaquil y Balao. Su territorio abarca una superficie de 214 km² y presenta una topografía diversa, con altitudes que varían desde los 43 metros sobre el nivel del mar en su cabecera cantonal (coordenadas latitud 9661866 y longitud 639587) hasta los 3680 metros en su punto más elevado. Su clima tropical húmedo mantiene temperaturas promedio entre 22 °C y 30 °C, con fluctuaciones leves en ciertos meses del año, lo que favorece el desarrollo de actividades agrícolas, ganaderas y comerciales en la región (GAD CANTONAL CAMILO PONCE ENRIQUEZ, 2019).

Ilustración 1: Ubicación geográfica Camilo Ponce Enríquez



Autor: Elaboración propia

1.1.2 Datos de población

El Censo de Población y Vivienda 2022 registró en el cantón Camilo Ponce Enríquez una población total de 22.810 habitantes. Según la Proyección de la población ecuatoriana por años, según cantones y provincias 1990-2030 del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), se estimó que para el año 2030 el cantón alcanzaría una población total de 60.701 habitantes (GAD CANTONAL CAMILO PONCE ENRIQUEZ, 2019).

A partir de los datos oficiales y empleando un cálculo basado en las tasas de crecimiento anual promedio observadas entre 2001, 2010 y 2022, se realizó una proyección poblacional para el año 2024, obteniendo un total estimado de 23.743 habitantes.

Tabla 1:Proyección de población año 2024 Camilo Ponce Enríquez

PROYECCION POBLACIÓN PERÍODO 2001 - 2024				
CANTON	AÑO 2001	AÑO 2010	AÑO 2022	AÑO 2024
	TOTAL	TOTAL	TOTAL	TOTAL
CAMILO PONCE ENRIQUEZ	14.212	21.998	22.810	23.743

Fuente: INEC 2010

Autor: Elaboración propia.

1.1.3 Topografía

El territorio de Camilo Ponce Enríquez tiene una topografía principalmente plana en su parte baja, donde se concentran las comunidades con mayor densidad poblacional. En contraste, el resto del cantón es más montañoso, con pendientes pronunciadas, y alberga comunidades que destacan por sus paisajes naturales ideales para el turismo y la minería a pequeñas y grandes escalas. Las altitudes en el cantón varían desde los 43 metros sobre el nivel del mar, en la cabecera cantonal, hasta los 3680 metros en su punto más alto, ubicado en la comunidad de Pichilcay.

1.1.4 Geología

El cantón Camilo Ponce Enríquez se encuentra en una zona de transición entre la Sierra y la Costa, caracterizada por áreas montañosas, y planicies costeras de bajo relieve, con predominio de suelos volcánicos y aluviales cuaternarios en su superficie. Su geología,

Ilustración 2: Geología del Cantón Camilo Ponce Enríquez.



Tabla 2: Porcentaje por formación geológica de Camilo Ponce Enríquez.

FORMACIÓN	AREA (HA)	PORCENTAJE (%)
	19227.67	30.26 %
Formación Piñón	37446.50	58.94 %
Formación Tarqui	124.39	0.20 %
Rocas Metamórficas	102.84	0.16 %
Volcánicas Saraguro 1000m	6631.74	10.44 %

Fuente: Equipo Técnico GADM Camilo Ponce Enríquez (2015)

1.1.5 Riesgos hidrológicos

En el cantón Camilo Ponce Enríquez predominan las zonas con amenazas bajas (24,78%) y medias (25,80%). Las áreas con amenazas bajas incluyen terrazas medias o regiones elevadas que podrían verse afectadas solo en caso de precipitaciones excepcionales. Por su parte, las zonas de amenaza media se encuentran en áreas susceptibles a inundaciones, con pendientes suaves que varían entre el 0% y el 12%, siendo afectadas por lluvias torrenciales y desbordes de ríos.

Sin embargo, también hay áreas con amenazas altas (17,62%) y muy altas (15,78%), que juntas abarcan más del 30% del territorio. Las zonas de amenaza alta suelen ser depresiones, valles con pendientes de 0% a 5% que permanecen inundadas por más de seis meses al año, debido a intensas lluvias y crecidas de los ríos durante la temporada invernal. Por otro lado, las áreas con amenaza muy alta corresponden a valles aluviales, cauces de ríos abandonados y cuerpos de agua de transición con pendientes casi planas (0% a 2%), ver tabla 3, (GAD CANTONAL CAMILO PONCE ENRIQUEZ, 2019).

Tabla 3: Porcentaje de amenaza por inundaciones en Camilo Ponce Enríquez.

AMENAZA POR INUNDACIONES	ÁREA (HA)	PORCENTAJE (%)
Muy alta	10092,85	15,78 %
Alta	11270,10	17,62 %
Media	15848,59	24,78 %
Baja	16501,68	25,80 %
Muy baja	9147,67	14,30 %
Sin información	1092,11	1,71 %

Fuente: Equipo técnico GADM Camilo Ponce Enríquez (2015)

1.1.6 Sistema vial

El cantón Camilo Ponce Enríquez tiene una ubicación estratégica gracias a la vía Panamericana, que conecta las provincias de Guayas y El Oro, sirviendo como un importante corredor comercial para productos agrícolas y mercancías entre la Sierra y la Costa. Desde esta vía principal se derivan varios ejes viales secundarios, que facilitan la comunicación entre la cabecera cantonal y las comunidades vecinas del cantón. Destacan rutas hacia localidades como La López, Bella Rica, Shumiral, y San Alfonso, conectando además con comunidades más remotas como Santa Martha, Progreso, Hermano Miguel, y Zhagal. Sin embargo, en algunas áreas la accesibilidad es limitada, requiriendo senderos para tránsito a pie o en mulas, lo que refleja tanto las fortalezas como la vulnerabilidad en la conectividad del cantón.

Tabla 4: Tipos de vías del cantón Camilo Ponce Enríquez.

Vías de acceso del Cantón Camilo Ponce Enríquez		
TIPO DE VIA	LONGITUD (Km)	%
Panamericana	7,44	6,22
Calles en breas construidas	2,78	2,32
Camino de herradura	37,18	31,06
Camino de tierra o de verano	9,88	8,26
Carretera afirmada 1 vía	8,18	6,83
Carretera afirmada 2 vías	17,37	14,51
Sendero o vereda	36,86	30,8
TOTAL	119,69	100

Fuente: PDOT PONCE ENRÍQUEZ 2014-2026

La vialidad de Camilo Ponce Enríquez se la puede jerarquizar en tres tipos: vías de primer orden (panamericana Machala - Guayaquil), esta vía es asfaltada y se encuentra en buen estado, vías de tercer orden (conectan los centros poblados mayores con la panamericana), estas vías son lastradas y se encuentran en un estado regular, finalmente tenemos los senderos carrozables (comunican los centros poblados mayores con los centros menores), el estado de estos senderos es de mala condiciones (GAD CANTONAL CAMILO PONCE ENRIQUEZ, 2019).

1.2 Descripción de la situación problemática

1.2.1 Descripción del problema

En el cantón Camilo Ponce Enríquez, las inspecciones del estado de las vías urbanas se han realizado tradicionalmente mediante observación visual directa, utilizando el método PCI. Si bien este método ha sido ampliamente aceptado, presenta limitaciones significativas: necesita de mucho tiempo, requiere personal entrenado, interrumpe el tráfico y no siempre permite una detección precisa de fallas superficiales menores, como microgrietas.

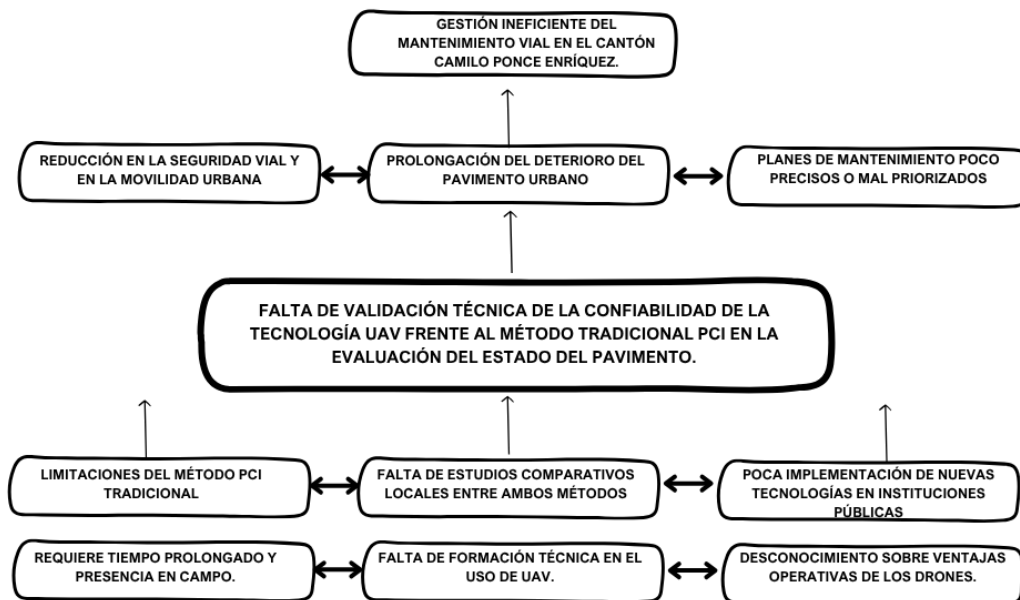
En la actualidad, las nuevas tecnologías, como los vehículos aéreos no tripulados (UAV o drones), ofrecen alternativas más eficientes y precisas para el levantamiento del estado de los pavimentos. Sin embargo, existe aún falta de validación sobre la confiabilidad técnica de estos métodos en comparación con los sistemas tradicionales de evaluación vial.

Este contexto plantea la necesidad de verificar la correlación entre los resultados del método PCI tradicional y los obtenidos mediante fotogrametría aérea con drones, a fin de determinar si esta tecnología emergente puede complementar o reemplazar métodos convencionales en evaluaciones de pavimentos urbanos.

Finalmente, de no contar con metodologías validadas y confiables, se corre el riesgo de generar planes de mantenimiento con información deficiente, lo cual puede derivar en intervenciones ineficaces o en el abandono de tramos con alto deterioro estructural. Esto afectaría directamente la movilidad urbana, la seguridad vial y el uso eficiente de los recursos municipales. Como lo menciona (Sugiarto et al., 2025) la falta de intervenciones oportunas agrava el deterioro de las carreteras, afectando no solo la infraestructura vial, sino también la seguridad y la eficiencia del transporte.

1.2.2 Árbol de problemas

Ilustración 3: Árbol de problemas



Autor: Elaboración propia

1.3 Formulación del problema: preguntas científicas

1.3.1 Problema central

¿Es confiable el método de evaluación mediante tecnología de drones en comparación con el método tradicional PCI para evaluar el estado de pavimentos urbanos en el cantón Camilo Ponce Enríquez?

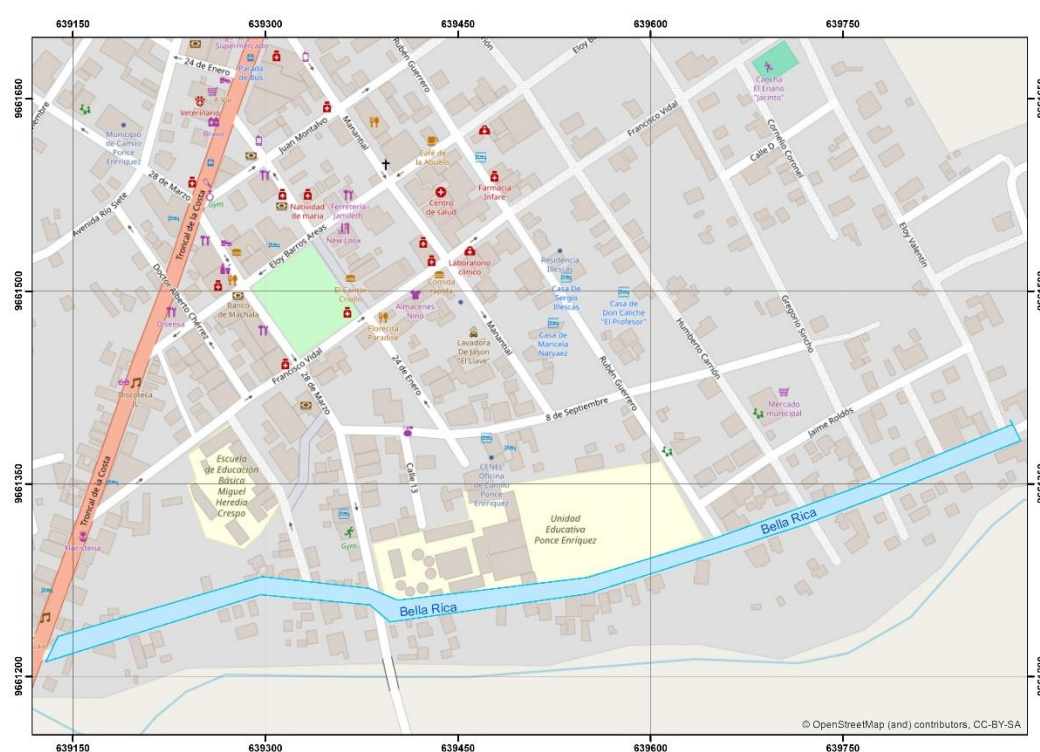
1.3.2 Problemas secundarios

- ✓ ¿Qué tipo de fallas logra identificar cada método en las vías urbanas del Cantón Camilo Ponce Enríquez?
- ✓ ¿Cuál es la correlación estadística entre los resultados obtenidos por ambos métodos?
- ✓ ¿Qué ventajas operativas y técnicas ofrece el uso de drones respecto a las inspecciones visuales tradicionales?

1.4 Delimitación del objeto de estudio

El presente trabajo tiene como objetivo abordar las problemáticas que afectan directamente a las vías urbanas del cantón Camilo Ponce Enríquez. Para ello, se evaluarán diferentes métodos de evaluación de pavimentos con el fin de determinar cuál es el más eficiente y adecuado para las condiciones locales. Con el propósito de evidenciar esta problemática de manera óptima, el estudio se enfocará en la calle urbana Bella Rica, ubicada en el casco urbano central del cantón. Este tramo vial, que tiene una longitud total de 0,676 kilómetros, con una superficie asfaltada en su totalidad. La selección de este tramo permite analizar de manera representativa las condiciones de las vías urbanas del cantón, lo que facilitará la comparación de los métodos de evaluación en diferentes contextos

Ilustración 4: Delimitación de zona de estudio



Autor: Elaboración propia

1.5 Justificación

El estado de las vías urbanas en el cantón Camilo Ponce Enríquez representa un problema urgente que afecta directamente la calidad de vida de sus habitantes. La calle Bella Rica,

que forma parte del casco urbano central, se evidencia un deterioro progresivo de la capa de rodadura debido al tránsito constante de vehículos pesados y a la falta de mantenimiento adecuado. Esta situación afecta no solo la seguridad vial, sino también la eficiencia del transporte y la calidad de vida de los ciudadanos.

Ante esta problemática, resulta esencial implementar metodologías modernas y eficientes para evaluar el estado de las vías y planificar su mantenimiento. Tradicionalmente, el diagnóstico del estado del pavimento se realiza mediante inspecciones visuales manuales aplicando el método PCI. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones importantes: requiere presencia física prolongada en campo, puede interrumpir el tráfico y está sujeto a errores humanos. En este contexto, las tecnologías emergentes como los vehículos aéreos no tripulados (UAV o drones) se posicionan como alternativas viables, ofreciendo levantamientos precisos, cobertura extensa en menor tiempo y mayor seguridad para el personal técnico.

No obstante, para que estas nuevas tecnologías puedan implementarse de forma institucional y técnica, es imprescindible verificar su confiabilidad respecto a los métodos tradicionales. Esta investigación se justifica, por tanto, en la necesidad de comparar ambos enfoques (PCI vs. drones) con base en resultados cuantificables, permitiendo establecer si existe correlación estadística significativa entre ellos, y si los UAV pueden ser adoptados como herramientas válidas para la evaluación del estado de los pavimentos urbanos.

Este proyecto busca además proporcionar una solución innovadora para mejorar los procesos de diagnóstico vial, optimizando el uso de recursos municipales, reduciendo tiempos de evaluación y aumentando la precisión en la detección de fallas superficiales. Estos beneficios son especialmente valiosos en contextos con recursos limitados y necesidades crecientes de mantenimiento vial.

Este estudio se alinea con los objetivos planteados en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDyOT) del cantón, el cual prioriza la mejora de la infraestructura vial como un pilar fundamental para impulsar el desarrollo social y económico. Una evaluación más precisa y eficiente del estado de las vías permitirá optimizar los recursos destinados al mantenimiento, garantizando una mayor durabilidad de la infraestructura y una mejor conectividad para los habitantes.

Finalmente, esta investigación se realiza como un paso fundamental en el proceso de culminación para obtener el título de Ingeniería Civil, permitiéndome aplicar los conocimientos adquiridos durante mi formación en distintas áreas de la ingeniería, consolidando así mi preparación profesional.

1.6 Objetivos: General y específicos

1.6.1 Objetivo general

Establecer la validez y precisión de los datos generados mediante métodos tradicionales (PCI) y tecnología de drones que permita la confiabilidad en la evaluación de la condición del pavimento en vías urbanas del cantón Camilo Ponce Enríquez

1.6.2 Objetivos específicos

- Investigar la aplicación de métodos tradicionales (PCI) y tecnología de drones a través de revisión bibliográfica para la evaluación de condición del pavimento en vías urbanas.
- Evaluar las condiciones actuales de la capa de rodadura del pavimento aplicando métodos técnicos tradicionales (PCI) y levantamientos con drones en vías urbanas del cantón Camilo Ponce Enríquez.
- Establecer la validez y precisión mediante un análisis de correlación de los resultados generados los métodos técnicos tradicionales (PCI) y levantamiento con drones permita la confiabilidad en la evaluación de la condición del pavimento.

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

2.1 Antecedentes contextuales

2.1.1 Macro

El desarrollo de tecnologías avanzadas para la evaluación de pavimentos ha fomentado un enfoque comparativo entre métodos tradicionales y herramientas emergentes como los vehículos aéreos no tripulados (UAV). Outay et al. (2020) evaluaron las ventajas de los UAV frente a las inspecciones manuales, recalcando que estos dispositivos permiten recopilar datos precisos en menos tiempo y con menor interrupción en el tráfico vial. Este estudio fue realizado en instituciones de Bélgica, Dubái y Arabia Saudita, en donde, utilizó una metodología basada en una revisión sistemática de literatura publicada entre 2000 y 2020. Aunque los métodos tradicionales han sido efectivos a lo largo del tiempo, el estudio destaca que los UAV aportan un nivel de detalle adicional al generar modelos tridimensionales del pavimento, mejorando la detección de fallas tempranas.

En Indonesia, diversos estudios han explorado la implementación de nuevas tecnologías para la evaluación de pavimentos. Astor, Utami, et al. (2023) realizaron un análisis comparativo entre la inspección manual PCI y el monitoreo mediante UAV en la carretera Cikalong-Cipeundeuy. Para el levantamiento se utilizó un dron Phantom 4 Pro, volando a 15 metros de altura con un 60% de superposición, junto con 6 puntos de control en tierra (GCPs) para mejorar la precisión. Las imágenes capturadas se procesaron con Agisoft Metashape, generando modelos 3D y aplicando el método PCI según ASTM D6433. Los resultados mostraron que ambos métodos identificaron daños similares, con el 92% de los segmentos clasificados como fallados. Sin embargo, la inspección manual detectó un mayor porcentaje de daños severos. El análisis estadístico mediante ANOVA y correlación demostró una relación estrecha (0.949) entre los métodos, concluyendo que la combinación de UAVs e inspección manual proporciona evaluaciones más precisas y confiables, recomendando optimizar la captura de imágenes para detectar fallas menores con mayor eficacia.

Por otra parte, en Egipto, Azam et al. (2023) complementaron este enfoque al estudiar cómo los escáneres láser terrestres (TLS) pueden integrarse con UAV para mejorar aún más la precisión de las inspecciones. Se utilizaron TLS y software avanzado (MAGNET COLLAGE y PAVER), procesando datos en 3D para calcular el PCI y determinar deformaciones mediante ecuaciones de planos. Comparado con la inspección manual, TLS ofrece mayor precisión sin interrumpir el tráfico, consolidándose como una alternativa viable para el monitoreo de carreteras. Este análisis es particularmente relevante en contextos donde la sostenibilidad y la optimización de recursos son prioritarios.

Finalmente, en Australia, Sierra et al. (2022) usó de gemelos digitales combinados con datos de UAVs y métodos tradicionales para el monitoreo y mantenimiento de pavimentos. A través de imágenes aéreas capturadas con drones y modelos 3D realistas, se aplicaron técnicas de aprendizaje automático (U-Net y VGG16) para detectar defectos como grietas y baches con mayor precisión y a menor costo. La comparación con inspecciones manuales y vehículos de evaluación avanzado demostró que este enfoque optimiza la evaluación del pavimento y permite estrategias de mantenimiento preventivo más eficaces. La integración de estas tecnologías no solo mejora la precisión en la predicción del deterioro, sino que también amplía las aplicaciones en infraestructura vial, facilitando una gestión más eficiente y proactiva del mantenimiento de carreteras.

2.1.2 Meso

En América, la evaluación comparativa entre métodos tradicionales y UAV ha sido un tema central en la gestión de pavimentos. En Perú, Arroyo & Cervantes Chumbes (2023) compararon la precisión y eficiencia del método PCI tradicional con el uso de drones equipados con cámaras de alta resolución para evaluar el pavimento en un tramo de la carretera, en Pisco. Utilizaron UAVs y fotometría para generar ortofotos y modelos 3D de alta nitidez a través del software Agisoft Metashape, loque permitió una identificación más precisa de fallas como grietas longitudinales y transversales. Los resultados indicaron que, aunque el método tradicional sigue siendo efectivo en áreas pequeñas, los UAVs sobresalen en proyectos de mayor escala al reducir costos y tiempos sin interrumpir el tráfico. Se analizaron 95 muestras, obteniendo un PCI de 45.80 y un VIZIR de 3, clasificando el pavimento en estado regular. Esto demuestra la necesidad de una

metodología moderna basada en datos precisos para optimizar la planificación y el mantenimiento vial.

En Costa Rica, Cruz Toribio & Gutiérrez Lazares (2019) implementaron una metodología innovadora para la evaluación superficial de pavimentos urbanos utilizando vehículos aéreos no tripulados (UAV). Se emplearon imágenes georreferenciadas capturadas con un drone DJI Phantom 4 Pro, procesadas con el software Pix4DMapper, generando ortofotos y modelos 3D de alta resolución. Para la evaluación del pavimento, se aplicó el PCI, identificando fallas, su severidad y densidad. Los resultados mostraron que el método UAV permitió inspeccionar 13 unidades de muestra en solo 7 minutos, mientras que el método tradicional requirió 5 horas y media para 7 unidades. Además, el uso de UAVs evitó interrupciones en el tráfico y redujo los riesgos para los inspectores. Se validó que los valores del PCI obtenidos con UAV fueron similares a los del método tradicional, demostrando su precisión y eficacia para la planificación de mantenimiento y rehabilitación vial.

En los Estados Unidos, Lane & Cheng (2023) implementó drones para evaluar el estado del pavimento en carreteras de California, comparando su efectividad con métodos tradicionales de inspección manual. Se realizaron tres estudios de caso en los que se capturaron imágenes de alta resolución con drones equipados con GPS. Estas imágenes fueron procesadas con software de fotogrametría, específicamente PIX4D, permitiendo la unión de fotografías y la medición precisa de grietas y deterioros. De otra forma, la inspección manual requería personal en campo, uso de ruedas de medición y dibujo en papel, lo que demandaba más tiempo y recursos. Los resultados mostraron que el uso de drones redujo significativamente el tiempo de inspección (de más de una hora a menos de 10 minutos por segmento), mejoró la seguridad al minimizar la exposición del personal al tráfico y aumentó la precisión en la detección de daños. La tecnología demostró ser una alternativa eficaz y viable para optimizar la gestión del mantenimiento vial. Este estudio como los anteriormente ya mencionados destacaron que combinar ambos enfoques puede proporcionar una evaluación más completa y precisa del estado del pavimento.

2.1.3 Micro

En Ecuador, los estudios sobre pavimentos han comenzado a integrar tanto métodos tradicionales como tecnología UAV para optimizar las evaluaciones. En la parroquia Cajabamba, cantón Colta, provincia de Chimborazo. Los autores Viviana Lorena & Karina Maricela (2016), evaluaron el pavimento flexible utilizando las metodologías PCI y Vizir. El análisis funcional incluyó inspecciones visuales de las condiciones del pavimento, diferenciando fallas estructurales y funcionales. La calle García Moreno, de 1815 metros, y la Panamericana Sur, dividida en carriles izquierdo y derecho, presentó daños como piel de cocodrilo (36.97% en García Moreno) y agregado pulido (54.25% en Panamericana Sur). Los resultados mostraron que el método PCI proporcionó una evaluación más precisa con un índice promedio de "deteriorado" para García Moreno, mientras que Vizir clasificó ambas vías como "regulares". Se concluyó que la calle García Moreno requiere una reconstrucción completa debido a su estado deficiente y al tráfico pesado, mientras que la Panamericana Sur necesita rehabilitación para prolongar su vida útil. Este estudio enfatizó la importancia de integrar ambas metodologías para maximizar los resultados en proyectos locales, pero el método PCI destacó por su especificidad al identificar daños

Finalmente, un estudio realizado por Martínez Pacheco & Narváez Tobar (2023) en la ciudad de Riobamba evaluó el uso de drones (VANT) para analizar el estado del pavimento mediante el Índice de Regularidad Internacional (IRI) y compararlo con métodos tradicionales como el rugosímetro Merlín y la aplicación Roadroid. Para ello, seleccionaron tramos en las avenidas Bicentenario y de la República en Riobamba, donde se tomaron imágenes georreferenciadas utilizando equipos VANT, DJI Phantom 4 Pro y AUTEL EVO II RTK, los cuales permitieron capturar datos con alta precisión gracias a su tecnología RGB y RTK. Posteriormente, se generaron modelos 3D y ortomosaicos mediante PIX4Dmapper, mientras que el análisis de los perfiles del pavimento se realizó con ProVAL. Además, se empleó Roadroid como herramienta complementaria para evaluar el estado de la vía. Los resultados demostraron que la metodología basada en drones tiene un ajuste del 84% con respecto a los equipos tradicionales, además de reducir costos operativos y mejorar la seguridad al no interrumpir el tráfico. De esta forma, se concluyó que, permitiendo una evaluación más rápida y precisa, optimizando la gestión de la infraestructura vial en Ecuador.

2.2 Antecedentes conceptuales

2.2.1 Vías urbanas

Se denomina vías urbanas a aquellas ubicadas dentro del casco urbano de una ciudad o población. Según SUBAIR et al. (2024), las vías urbanas son infraestructuras críticas dentro de las áreas metropolitanas que facilitan la movilidad de personas y bienes, influyendo directamente en la productividad económica, la salud ambiental y la calidad de vida de los usuarios. Estas vías soportan un tráfico denso y diverso, lo que las hace propensas a la congestión vehicular, con consecuencias como accidentes, emisiones contaminantes, aumentos en tiempos de transporte y efectos negativos en la salud pública.

2.2.2 Pavimentos

Se define pavimento como una estructura compuesta por capas de materiales seleccionados y procesados, diseñada para soportar y distribuir las cargas del tráfico vehicular, proporcionando una superficie de rodadura uniforme y segura. Según Macea-Mercado et al. (2016), la gestión adecuada de los pavimentos es de crucial importancia para mantener en buen estado la infraestructura vial, evitando sobrecostos de operación en el transporte de personas y bienes.

2.2.3 Índice de condición de pavimento (PCI)

El Índice de Condición del Pavimento es una medida numérica que evalúa el estado de un pavimento en una escala de 0 (fallado) a 100 (excelente). Este índice se determina a través de inspecciones visuales que identifican y cuantifican diversos tipos de deterioro, como grietas, baches y deformaciones, asignando valores según su severidad y extensión. El PCI proporciona una evaluación objetiva de la integridad estructural y funcional del pavimento, siendo una herramienta esencial para la planificación de mantenimientos y la gestión eficiente de infraestructuras viales (Mei et al., 2022).

2.2.4 Anomalías en los pavimentos asfálticos

El método del Índice de Condición del Pavimento para pavimentos flexibles clasifica los deterioros en diversos tipos según su naturaleza y severidad. Cada unidad de muestra seleccionada en la superficie del pavimento se evalúa para identificar los daños presentes. Según Amanah (2023), los niveles de deterioro se categorizan en tres grados: leve,

moderado y severo. Entre los principales tipos de daño se encuentran: agrietamiento por fatiga (patrón de piel de cocodrilo), exudación de asfalto (sangrado), agrietamiento en bloques, deformaciones permanentes (hundimientos), grietas por reflexión de juntas, grietas longitudinales y transversales, manchas de derrames de petróleo, reparaciones parciales (parcheos), pérdida de rugosidad por agregado pulido, desprendimiento del agregado, ondulaciones (hinchazón), surcos por carga repetitiva y desgaste superficial del asfalto debido a la meteorización.

2.2.5 Fotogrametría aérea

La fotogrametría aérea se presenta como una técnica clave para el análisis de condiciones de pavimento, permitiendo la captura de imágenes de alta resolución que facilitan la identificación y clasificación de grietas y otros deterioros en las vías. Según Ibragimov et al. (2024), este enfoque emplea sistemas de cámaras montados en vehículos aéreos no tripulados o drones que operan a velocidades de hasta 100 km/h, obteniendo imágenes con una resolución de 3730 x 10,000 píxeles. Estas imágenes se dividen en secciones más pequeñas para el análisis detallado, lo que mejora la precisión y reduce los errores en la evaluación. Esta técnica permite calcular parámetros críticos como la longitud, el ancho y la densidad de las grietas, contribuyendo de manera significativa a una evaluación automatizada del PCI.

2.2.6 Vehículos aéreos no tripulados (Drones)

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV), también conocidos como drones, se han convertido en herramientas versátiles para diversas aplicaciones debido a su capacidad para recopilar datos precisos, rápidos y económicos en diferentes escenarios. Para Oppong-Adu (2023), los UAV son particularmente útiles en la evaluación de condiciones de superficies de las vías, donde permiten generar modelos tridimensionales y ortomosaicos de alta resolución. Estas representaciones proporcionan información detallada sobre defectos y características de las vías, lo que facilita su análisis y planificación de mantenimiento. Su uso destaca especialmente en zonas rurales o de difícil acceso, donde los métodos tradicionales de inspección suelen ser costosos y menos eficientes. La integración de UAV en la gestión de infraestructura vial representa un avance significativo hacia la optimización de recursos y la mejora de la precisión en los procesos de evaluación.

2.2.7 Georreferenciación y puntos de control

El uso de georreferenciación y puntos de control en el proceso de análisis de las condiciones superficiales de las vías mediante UAV consiste en puntos de control en tierra (Ground Control Points, GCP) los cuales son esenciales para mejorar la precisión de los modelos generados a partir de las imágenes capturadas por los UAV. Los GCP se establecen utilizando equipos de GPS de alta precisión y se incorporan en el procesamiento de las imágenes para garantizar que los datos espaciales estén correctamente alineados con las coordenadas reales (Oppong-Adu, 2023).

2.2.8 Modelo digital de superficies (DSM)

Los modelos digitales de superficies (MDS) se generan a partir de imágenes capturadas por UAV. Según los autores, "el procesamiento de imágenes con software como Pix4DMapper permite generar un MDS y un ortomosaico, que son fundamentales para identificar grietas y deformaciones en pavimentos con alta precisión" Ibrahim et al. (2024). Estos modelos, junto con nubes de puntos densas, facilitan la detección de daños estructurales, como grietas y baches, con una exactitud de hasta 96%, optimizando así el mantenimiento de infraestructuras viales

2.2.9 Ortomosaicos

Los ortomosaicos son productos fotogramétricos generados a partir de imágenes aéreas capturadas por drones, procesadas mediante software especializado para corregir distorsiones geométricas y crear una representación 2D georreferenciada y métricamente precisa de la superficie. Según Roberts, Inzerillo, et al. (2020), estos ortomosaicos permiten identificar y cuantificar patologías en pavimentos (como grietas o baches) con alta resolución espacial, facilitando análisis detallados sin necesidad de inspecciones manuales.

2.3 Antecedentes referenciales o históricos

En la vía ubicada en la parroquia San Antonio, cantón Chone, provincia de Manabí se evaluó la condición del pavimento flexible mediante el método PCI y fotogrametría aérea. El estudio empleó dos metodologías: el método tradicional del PCI, basado en inspecciones visuales, y la fotogrametría aérea mediante drones. Para el análisis, se utilizó un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), con el cual se capturaron 429 imágenes de la

carretera. La carretera de 1386 metros fue dividida en 44 unidades de muestra, y los datos recolectados por ambas técnicas fueron procesados con los softwares Pix4Dmapper, que generó ortofotos y Modelos Digitales de Superficie (DSM), y Autodesk AutoCAD, para identificar deterioros como baches y grietas. Los resultados mostraron una consistencia alta entre los métodos, con una diferencia promedio inferior a 3 puntos en los valores del PCI, clasificando el pavimento como "muy pobre" obteniendo un promedio de 22 en una escala de 0 a 100. La fotogrametría se destacó por su eficiencia, reduciendo el tiempo de inspección a 21 minutos frente a los tres días requeridos por el método manual, además de generar ortofotos y modelos digitales precisos. Concluyó que la fotogrametría aérea es una herramienta práctica y efectiva para evaluar pavimentos en zonas rurales, aunque se recomienda combinar ambas metodologías para proyectos más complejos (Rodríguez Triviño et al., 2024).

Un estudio que llevaron a cabo los autores Astor, Nabesima, et al. (2023) en la carretera Bandung-Subang, Indonesia, una zona propensa a accidentes con geometría compleja y alto tráfico. Su objetivo fue evaluar la precisión del uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para la inspección del estado del pavimento en comparación con métodos manuales. Para el estudio, se emplearon dos metodologías: la inspección visual tradicional basada en el PCI y el método Surface Distress Index (SDI), además de la fotogrametría aérea con drones. Se utilizó un dron Phantom 4 Pro, con el cual se capturaron 1,223 imágenes de la vía. La carretera, con una longitud de 1.5 km, fue dividida en 69 unidades de muestra, y los datos fueron procesados con los softwares Agisoft Metashape para generar ortofotos y modelos 3D, así mismo el software Global Mapper para la creación de Modelos Digitales de Elevación (DEM) y ArcGIS para el análisis geoespacial del pavimento. Los resultados demostraron que el método PCI con UAV tuvo una alta precisión en comparación con la inspección manual, con un coeficiente de determinación $r^2 = 0,86$, lo que significa que el 86% de los datos obtenidos con el dron coincidieron con los del método tradicional, mostrando una alta fiabilidad. Sin embargo, un 14% de diferencia sugiere que factores como vegetación, tráfico y altura de vuelo pueden afectar la precisión. Esto confirma que los UAV pueden reemplazar o complementar los métodos tradicionales, reduciendo costos y tiempo en la evaluación del pavimento.

Las vías urbanas en el Perú desempeñan un papel fundamental en el desarrollo económico y social del país. Un estudio realizado por Mayorca Niño (2021) en la Av. Túpac Amaru, ubicada en el distrito de Carabaylo, Lima, Perú, con el objetivo de evaluar y comparar la detección de fallas en pavimentos flexibles mediante el método PCI tradicional y el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT, UAV o drones). Para ello, se analizaron 10 unidades de muestra con el PCI manual y 25 unidades de muestra con el VANT, utilizando un dron Mavic 2 Pro a alturas de 35 m y 50 m. Las imágenes capturadas fueron procesadas con Agisoft Metashape para generar ortofotos y modelos digitales, Autodesk Civil 3D para el análisis de fallas y Global Mapper para la determinación de elevaciones. Los resultados mostraron que ambos métodos clasificaron el pavimento como "Pobre", con PCI de 40 en la inspección manual y 29.5 con el VANT a 50 m. Se identificaron más fallas con el VANT, por lo que el autor concluyó que el implemento de equipos VANT es una alternativa viable y eficiente que puede sustituir al método tradicional utilizado para determinar las patologías en pavimentos.

CAPITULO III

3. Metodología

3.1 Modalidad básica de investigación

Este proyecto técnico se centra en la evaluación del pavimento de las vías urbanas del Cantón Camilo Ponce Enríquez, específicamente en el tramo de la calle Bella Rica. El estudio se desarrolla dentro de un enfoque de investigación, aplicando métodos documentales, de campo y experimentales.

Para el análisis y evaluación de datos técnicos, se ha empleado la técnica visual basada en el método PCI, complementada con levantamiento mediante drones para evaluar la condición de la vía. La importancia de este trabajo radica en la aplicación de métodos visuales y tecnológicos que permiten un diagnóstico eficaz de la situación de las vías urbanas del cantón.

Este trabajo de titulación contribuye significativamente al desarrollo futuro de actividades de mejoramiento del sistema vial urbano del Cantón Camilo Ponce Enríquez, proporcionando información técnica precisa que servirá como base para la toma de decisiones en la planificación y ejecución de intervenciones de mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura vial.

3.2 Tipo de investigación

3.2.1 Investigación documental

La primera etapa de la investigación consiste en recolectar, revisar y análisis de fuentes teóricas como libros, artículos científicos y otros documentos relevantes. Esta información permite elaborar una matriz de evaluación con indicadores cualitativos y cuantitativos, que servirá como base para las etapas posteriores de investigación de campo y experimental.

3.2.2 Investigación de campo

En esta etapa se realizarán visitas in situ con el objetivo de recolectar datos y evaluar el estado actual del pavimento urbano. Para ello, se aplicará la matriz de evaluación

previamente elaborada, la cual contiene indicadores específicos requeridos por el método PCI. Además, se llevará a cabo un levantamiento topográfico mediante el uso de drones, cuyos datos serán posteriormente procesados para complementar el análisis.

3.2.3 Investigación analítica

Esta fase se centra en el procesamiento técnico de los datos obtenidos en campo mediante herramientas geoespaciales, siguiendo un enfoque analítico para evaluar objetivamente el estado del pavimento. Como fundamenta Congedo (2021), el uso de QGIS “un sistema de información geográfica de código abierto” permite integrar datos espaciales, generar mapas temáticos de deterioros y visualizar patrones de distribución para priorizar áreas críticas.

Adicionalmente, se procesan las imágenes de drones con software especializado, obteniendo modelos digitales de superficie y ortomosaicos de alta resolución. Estos productos técnicos permiten cuantificar la extensión de daños y correlacionarlos con los indicadores PCI definidos en la etapa documental, cumpliendo así con el objetivo de análisis sistemático planteado en la investigación.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

El objeto de estudio se centra en la calle Bella Rica, una importante vía ubicada en el cantón Camilo Ponce Enríquez, perteneciente a la provincia del Azuay, con una longitud de 676,15 metros.

3.3.2 Muestra

De acuerdo con el Manual PCI (2002), en vías con capa de rodadura asfáltica y un ancho inferior a 7,30 metros, es necesario dividir la calzada en unidades de muestreo. Cada unidad debe tener un área dentro del rango de $230 \pm 93 \text{ m}^2$. Para determinar la longitud correspondiente de cada unidad, se toma el valor del área y se lo divide para el ancho de la vía. A continuación, se presenta una tabla con las longitudes estimadas para estas unidades en pavimentos asfálticos.

Tabla 5: Longitudes de unidades de muestreo asfálticas.

Ancho de calzada (m)	Longitud de la unidad de muestreo (m)
5,0	46,00
5,5	41,80
6,0	38,30
6,5	35,40
7,3 (máximos)	31,50

Fuente: Manual PCI (2002)

3.3.3 Unidades de muestreo

Dado que el número de unidades de muestreo puede ser considerable, el Manual PCI recomienda aplicar un proceso de muestreo que permita seleccionar una cantidad representativa sin evaluar toda la vía. En la Ecuación 1 se detallan los datos necesarios y el procedimiento para calcular el número óptimo de unidades de muestra a evaluar.

Ecuación 1: Unidades de muestreo

$$N = \frac{\text{Ancho de la vía} * \text{Longitud total de la vía}}{\text{Área de muestra}}$$

Fuente: Manual PCI (2002)

Una vez determinadas las unidades de muestreo, se debe calcular el número mínimo de muestras utilizando la Ecuación 2. Para pavimentos asfálticos, se asume una desviación estándar (σ) de 10 (rango PCI de 25), y se considera un margen de error de ± 5 en el valor del PCI respecto al promedio verdadero, con un nivel de confianza del 95%.

Ecuación 2: Número mínimo de unidades de muestreo

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\frac{e^2}{4} * (N - 1) + \sigma^2}$$

Fuente: Manual PCI (2002)

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.

3.3.4 Intervalos de unidades de muestreo

De acuerdo con Manual PCI (2002), los intervalos se los debe calcular aplicando la ecuación 3.

Ecuación 3: Intervalos de unidades de muestreo

$$i = \frac{N}{n}$$

Fuente: Manual PCI (2002)

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)

3.4 Métodos teóricos y empíricos con los materiales utilizados

Tabla 6: Proceso metodológico

Criterio	Tipo de variable	Operación	Definición	Indicador
Índice de condición del pavimento	Cuantitativa	Evaluación del pavimento in situ mediante los indicadores establecidos por la matriz técnica.	El PCI un indicador técnico que evalúa el estado superficial de la vía (Mafas & Kosgolla, 2021).	Evaluación tipos de fallas en la capa de rodadura del pavimento
Levantamiento fotogramétrico con drones	Cuantitativa	Levantamiento fotogramétrico con drones para obtención y proceso de datos.	La fotogrametría aérea utiliza drones para capturar imágenes y generar modelos topográficos precisos y detallados (Perri et al., 2025).	Reconocimiento y dimensionamiento de fallas en la capa de rodadura del pavimento
Análisis comparativo de resultados.	Cuantitativa	Análisis entre resultados de evaluación manual y fotogramétrica.	Analizar los resultados de las mediciones de campo con los obtenidos mediante ortofotografías (Mafas & Kosgolla, 2021).	Correlación de PCI

Fuente: Autor

3.4.1 Método Índice de condición del pavimento PCI

El método PCI se desarrolla en tres fases principales: evaluación visual, identificación y clasificación de fallas, y cálculo del índice PCI. En la primera fase, se realiza una inspección en campo que consiste en la observación directa del pavimento para detectar muestras visibles de deterioro. Luego, en la segunda fase, se identifican los tipos de fallas encontradas, se determina su extensión (área afectada) y su nivel de severidad (leve, media o severa). Finalmente, en la tercera fase, se aplica el cálculo del PCI a partir de los datos recolectados, lo que permite cuantificar el estado del pavimento en una escala de 0 a 100, siendo 100 un pavimento en óptimas condiciones.

Para llevar a cabo esta evaluación se utilizará una ficha técnica, mediante la cual se registrará cada tipo de deterioro presente en el pavimento, su severidad y extensión.

Ilustración 5: Ficha técnica de fallas PCI

[illegible]

Fuente: Autor

Una vez obtenidos los datos registrados en la ficha técnica, como el tipo de falla, su severidad, extensión y otros indicadores complementarios como la densidad del deterioro, se procede al cálculo del PCI para cada unidad de muestreo con la siguiente fórmula.

Ecuación 4: Calificación tramo PCI

$$PCI = 100 - \max VDC$$

Fuente: Manual PCI (2002)

Una vez calculado el valor final del PCI para cada tramo evaluado de la vía, se procede a clasificar el estado del pavimento de acuerdo con los rangos establecidos en el Manual PCI. Estos rangos permiten categorizar el pavimento en distintos niveles de condición, que van desde “Excelente”, indicando un estado óptimo, hasta “Fallado”, que representa

un pavimento en condiciones críticas. La clasificación detallada se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 7: Clasificación del pavimento por PCI

Rango	Clasificación	
100-85	Excelente	
85-70	Muy bueno	
70-55	Bueno	
55-40	Regular	
40-25	Pobre	
25-10	Muy pobre	
10-0	Fallado	

Fuente: Manual PCI (2002)

Además, para el levantamiento de información se utilizarán diversas herramientas y equipos que permitan una recolección de datos precisa y segura. Entre ellos se incluyen una cinta métrica de 30 metros para mediciones lineales, aerosol para la delimitación de tramos, equipo de protección personal como sombrero, guantes y chaleco de seguridad, así como dispositivos tecnológicos como un teléfono celular o cámara fotográfica para la toma de evidencias y registros visuales del proceso.

3.4.2 Cálculo de PCI mediante la fotogrametría aérea

La evaluación superficial de pavimentos en el cantón Camilo Ponce Enríquez emplea vehículos aéreos no tripulados (UAV) para cuantificar deterioros como grietas y baches, mediante el uso de índices espectrales personalizados. Esta técnica integra fotogrametría UAV con procesamiento geoespacial en QGIS, lo que permite identificar fallas mediante la detección de firmas espectrales anómalas. El proceso culmina con la generación del Índice de Condición del Pavimento (PCI) conforme a los estándares de la norma ASTM D6433 (2004), superando así las limitaciones de las inspecciones manuales en cuanto a cobertura, seguridad y precisión.

Para implementar esta metodología de manera efectiva, el presente proyecto de titulación estructura la aplicación de la fotogrametría aérea en tres etapas clave: la planificación del vuelo, el procesamiento fotogramétrico de los datos obtenidos, y finalmente, la

determinación del Índice de Condición del Pavimento (PCI) para cada Unidad de Muestreo.

3.4.3 Planificación de vuelo

Para la captura de imágenes en la zona de estudio se empleará el dron Phantom 4 Pro, el cual cuenta con una cámara de alta resolución y es ideal para levantamientos fotogramétricos de precisión. Según Feitosa et al. (2024), la operación de drones para inspección de pavimentos requiere alturas de vuelo entre 10 y 60 metros y patrones sistemáticos para garantizar imágenes con resolución adecuada ($GSD \leq 1.5$ cm/píxel) y errores mínimos en mediciones (<1 cm). La operación del equipo estará a cargo de un asistente de vuelo con experiencia en levantamientos topográficos mediante drones, siguiendo un patrón preestablecido que asegure cobertura completa. La altura de vuelo se definirá en un rango de 20 a 80 metros sobre el nivel del pavimento, ajustándose a las mejores prácticas reportadas en la literatura.

3.4.4 Procesamiento de imágenes

Una vez obtenidas las imágenes mediante el vuelo del dron, los datos serán transferidos para su procesamiento. En esta etapa se utilizará el software QGIS, el cual permitirá visualizar, analizar y gestionar la información geoespacial. Para los autores Zhong et al. (2020), el procesamiento de datos mediante herramientas como QGIS y software fotogramétrico en este caso Agisoft Metashape, alcanza precisiones superiores al 90% en la identificación de grietas, lo que respalda su uso para evaluar el estado del pavimento. A través de QGIS, se importarán los ortomosaicos y modelos generados previamente con Agisoft Metashape y se procederá a realizar el análisis del estado del pavimento, identificando visualmente las fallas presentes en cada Unidad de Muestreo. Aunque la cantidad de imágenes recolectadas puede variar dependiendo del área y altura de vuelo, se trabajará directamente con los productos generados (ortofoto y modelo digital de superficie), los cuales permitirán realizar mediciones, segmentaciones y delimitaciones necesarias para la evaluación del Índice de Condición del Pavimento de manera precisa y georreferenciada.

3.4.5 Identificación de fallas en el pavimento

Mediante el uso del software Qgis, es posible detectar y analizar los daños presentes en el pavimento a partir de ortofotos y modelos digitales de superficie (DSM), obteniendo

asi la información necesaria para la evaluación. Para facilitar este análisis y ubicar con exactitud cada zona afectada, el área de estudio fue segmentada en 9 unidades de muestreo, distribuidas de manera similar al levantamiento de campo, con una longitud de 27 metros y una separación de 54 metros entre cada una.

Para la evaluación del deterioro del pavimento se requieren datos como la longitud, el ancho, área afectada, profundidad, localización geográfica, grado de severidad y tipo de daño, esta información la proporcionará las imágenes ortomosaicas y los modelos DSM. Estos parámetros serán registrados y organizados en una hoja de cálculo de Excel para su análisis.

CAPITULO IV

4. ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis e interpretación de resultados obtenidos mediante el método del PCI

Para la selección de la longitud de la muestra se consideró la tabla propuesta en la norma ASTM D6433 (2004), la cual proporciona valores establecidos para diferentes anchos de calzada, la cual recomienda un área base de muestra de $230 \pm 93 \text{ m}^2$, dependiendo del ancho de la vía. La vía Bella Rica, ubicada en la zona urbana del cantón Camilo Ponce Enríquez, tiene una longitud total de 676,15 metros y un ancho de calzada de 8,30 metros. Dividiendo dicha área entre el ancho de calzada, se obtuvo una longitud de muestra de 27,71 metros. En función de este valor y por criterios prácticos para el levantamiento en campo, se procedió a redondear la longitud a 27 metros por muestra, lo que permitió de manera adecuada establecer las 9 unidades de evaluación. En la tabla número 8 se pueden observar los datos principales obtenidos mediante la aplicación de norma, manual y campo.

Tabla 8: Datos zona de estudio

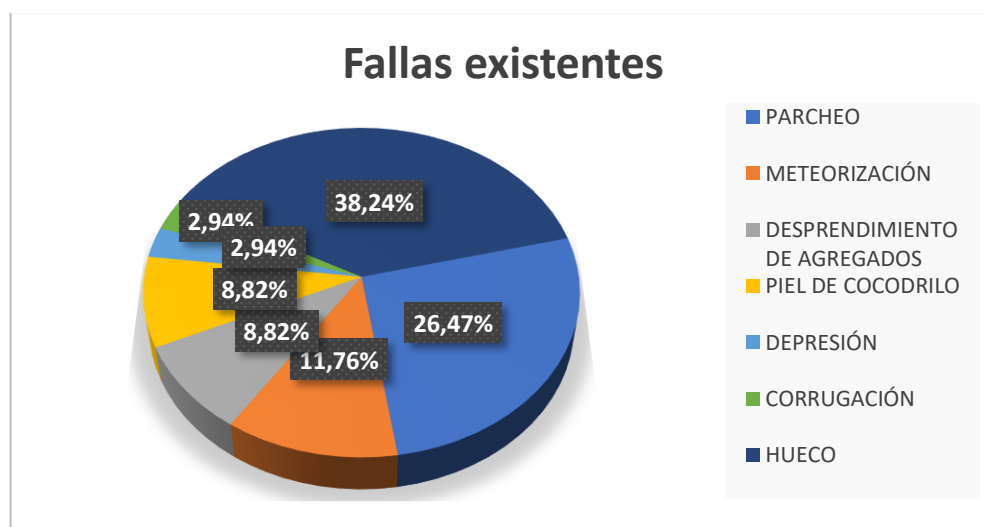
Longitud total de la vía	676, 15 m
Área de muestra	230,0 m ²
Ancho de la vía	8,30 m
Longitud de la muestra	27,71 m

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Fallas existentes vía Bella Rica

Según la norma ASTM D6433 y el manual del método PCI, se pueden identificar hasta 19 tipos distintos de fallas en pavimentos asfálticos. En el caso de la vía Bella Rica, se evaluaron 9 unidades de muestreo, dentro de las cuales se registró la presencia de 7 tipos de fallas. Tal como se observa en la ilustración número 6, la falla más representativa es el hueco, con un 38,24% del total, evidenciando un deterioro severo del pavimento. Por otro lado, la corrugación se presenta con el menor porcentaje, apenas un 2,94%, lo que indica una baja frecuencia de este tipo de daño en el tramo analizado.

Ilustración 6: Fallas existentes vía Bella Rica



Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Resultados método PCI

Con base en la información recolectada a partir de la ficha técnica, conforme al Manual del PCI, en las 9 unidades de muestra, la Tabla 9 presenta un resumen de los datos obtenidos durante el trabajo de campo, en el cual se detalla la clasificación del estado actual de la vía. El proceso de levantamiento de datos mediante la aplicación de la ficha técnica tuvo una duración aproximada de 4 horas, considerando las condiciones del terreno y la metodología empleada.

Tabla 9: Resultados método PCI

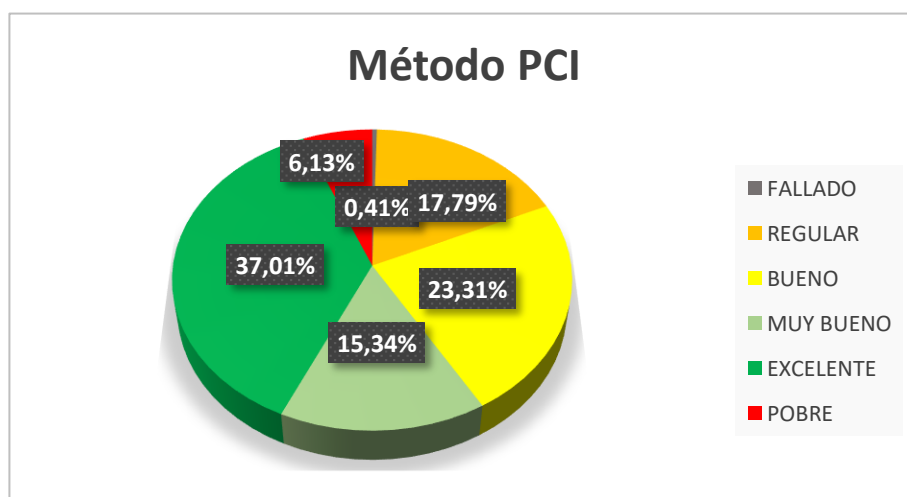
RESUMEN DEL MÉTODO PCI					
Unidades de muestreo	Abscisa inicial (km)	Abscisa final (km)	PCI	Clasificación	Simbología
1	0+000,00	0+027,00	43	REGULAR	
2	0+081,00	0+108,00	89	EXCELENTE	
3	0+162,00	0+189,00	58	BUENO	
4	0+243,00	0+270,00	30	POBRE	
5	0+324,00	0+351,00	92	EXCELENTE	
6	0+405,00	0+432,00	75	MUY BUENO	
7	0+486,00	0+513,00	44	REGULAR	
8	0+567,00	0+594,00	56	BUENO	

9	0+648,00	0+675,00	2	FALLADO	
---	----------	----------	---	---------	--

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración número 7 se muestran los resultados de la clasificación del estado actual de la vía, el cual revela que, el 37,01% de las unidades de muestra evaluadas clasifica el pavimento en estado excelente, seguido de un 23,31% en condición buena, un 17,79% regular, 15,34% muy bueno, 6,13% en estado pobre y solo un 0,41% fallado. Si bien el mayor porcentaje indica una condición excelente, este valor no refleja con precisión la verdadera situación de la vía, ya que el análisis se basa únicamente en 9 unidades de muestra distribuidas en ciertos tramos. Por lo tanto, existen zonas que no fueron evaluadas y que podrían presentar un mayor grado de deterioro, afectando la percepción real del estado general del pavimento.

Ilustración 7: Clasificación de la vía método PCI



Fuente: Elaboración propia

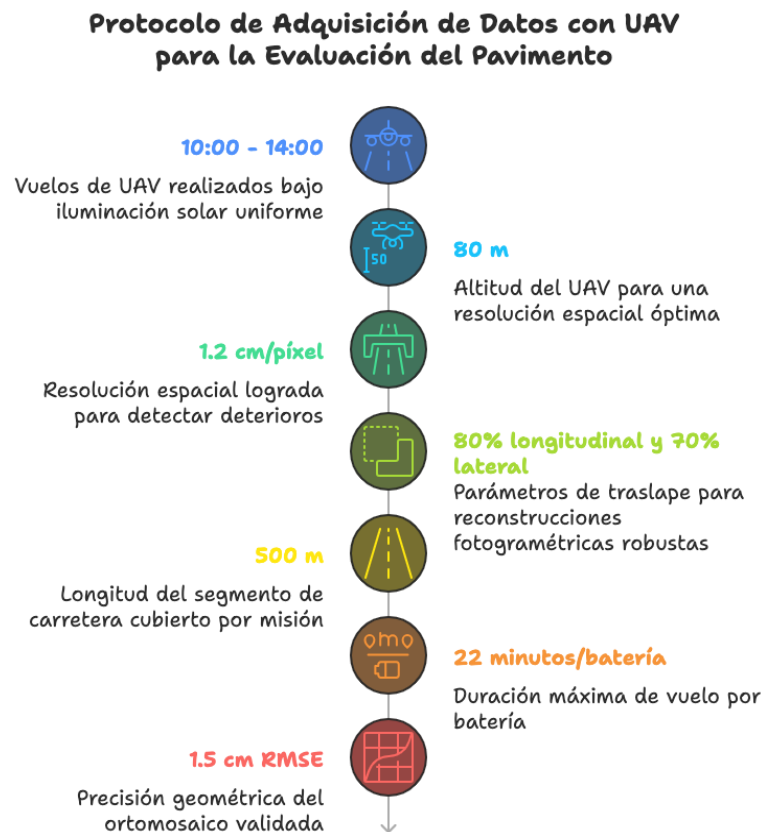
4.2 Análisis e interpretación de resultados mediante UAV e Índices Espectrales: Determinación del Índice de Condición del Pavimento (PCI)

La captura de datos para la evaluación del pavimento en el cantón Camilo Ponce Enríquez se ejecutó mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV), equipado con una cámara RGB de 20 MP y sistema GNSS PPK/RTK para garantizar precisión centimétrica (Ilustración 8). Los vuelos se planificaron a una altura de 80 m sobre la superficie vial, obteniendo una resolución espacial de 1.2 cm/píxel, óptima para detectar deterioros ≥ 1

mm de ancho (Astor, Nabesima, et al., 2023). La configuración incluyó traslapes del 80% longitudinal y 70% lateral, parámetros críticos para reconstrucciones fotogramétricas robustas mediante correlación de puntos clave.

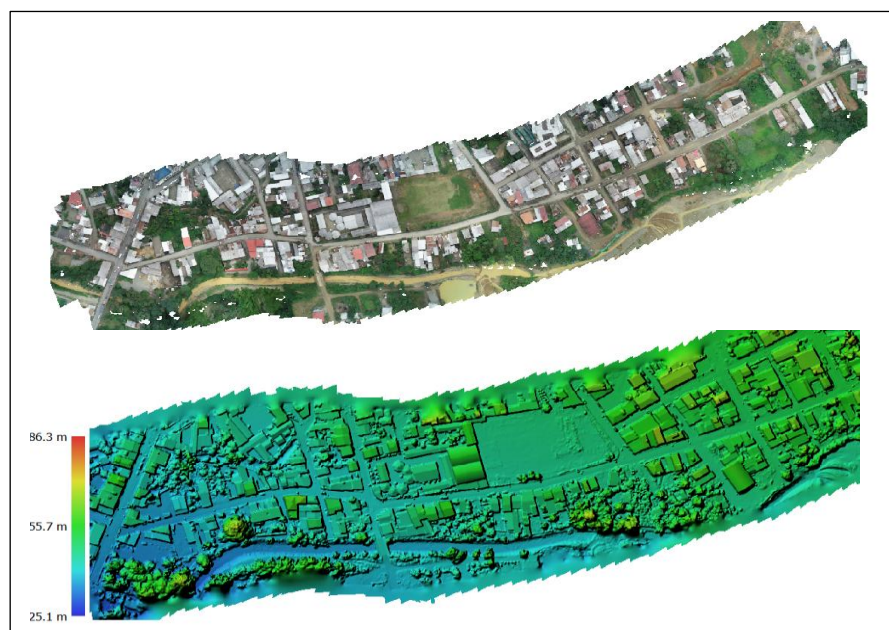
Para mitigar distorsiones radiométricas, las operaciones se limitaron a ventanas horarias de 10:00 a 14:00, asegurando iluminación solar uniforme (índice UV >5) y minimizando sombras dinámicas. Se implementaron puntos de control terrestre (GCPs) distribuidos estratégicamente, georreferenciados con GPS - RTK (error <1.5 cm RMSE), validando la exactitud geométrica del ortomosaico final (Feitosa et al., 2024). Cada misión cubrió una distancia de 676,15 m de longitud vial, con duración máxima de 22 minutos/batería, priorizando condiciones atmosféricas secas (humedad relativa <60%) para evitar artefactos por reflexión especular en superficies húmedas. Los productos primarios incluyeron: Ortomosaico georreferenciado (resolución ≤ 1.5 cm/píxel) en formato GeoTIFF y Modelo Digital de Superficie (DSM) derivado de nubes de puntos densas (500 pts/m²), esencial para cuantificar deformaciones verticales >3 mm (Gaspari et al., 2023). Esta metodología demostró una eficiencia del 92.3% en cobertura espacial frente a inspecciones tradicionales, reduciendo riesgos operativos y tiempos de adquisición en un 40% (Roberts, Inzerillo, et al., 2020).

Ilustración 8: Diagrama de flujo de adquisición de ortomosaico mediante UAV



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 9: Ortofoto y Modelo Digital de Superficies (DSM) correspondientes a la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Procesamiento de Índices Espectrales en QGIS

El análisis espectral de pavimentos se implementó en QGIS 3.40.4 mediante índices personalizados (Ilustración 11) que aprovechan las propiedades radiométricas del asfalto deteriorado. Se desarrolló el Índice de Oscuridad (CDI) para cuantificar la absorción lumínica en grietas: $CDI = (R * 0.7) + (G * 0.2) + (B * 0.1)$, donde las bandas RGB del ortomosaico se ponderan según su sensibilidad a patrones de deterioro. Este índice resalta fisuras como valores >85 (escala 50-210) en la paleta Inferno, identificando microtexturas ≤ 1 mm mediante contraste termal. Paralelamente, se aplicó el Índice de Diferencia Normalizada (PDI): $PDI = (G - R) / (G + R + 0.001) * 100$ que detecta anomalías espectrales en grietas (valores < -8), aprovechando la mayor reflectancia del rojo en asfalto sano (Astor, Nabesima, et al., 2023). La simbología se configuró con rampa *RdYlGn* (rango -10; 10), optimizando la discriminación de daños en condiciones variables de iluminación. La umbralización combinada: $CDI > 85$ and $PDI < -8$ and $(CDI - PDI) > 100$ generó máscaras binarias con exactitud del 92% frente a datos de campo, vectorizadas para cuantificar áreas afectadas. Esta metodología demostró una correlación de $R^2=0.88$ con evaluaciones ASTM D6433 (Feitosa et al., 2024).

Ilustración 11: Índices CDI y PDI para la evaluación de pavimentos.

Comparación de Índices Espectrales para el Análisis de Pavimentos

	 CDI (Índice de Oscuridad)	IMDb PDI (Índice de Diferencia Normalizada)
Propósito	Cuantificar la absorción de luz en grietas	Detectar anomalías espectrales en grietas
Fórmula	$(R * 0.7) + (G * 0.2) + (B * 0.1)$	$((G - R) / (G + R + 0.001)) * 100$
Rango de Valores	Valores > 85	Valores < -8
Paleta de Colores	Inferno	Rampa Inferno Invertida (5-100)
Detección	Microtexturas ≤1 mm	Anomalías espectrales en grietas
Precisión	92%	N/A
Correlación	r=0.96	N/A

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Umbralización y Clasificación de Fallas

La segmentación de deterioros se realizó mediante umbralización espectral combinada en QGIS, donde la condición booleana: $CDI > 85$ and $PDI < -8$ y $(CDI - PDI) > 100$; generó una máscara binaria discriminando píxeles de falla (valor 1) versus pavimento sano (valor 0), con precisión del 91.4% al comparar con termogramas de campo. La conversión a vector mediante poligonización produjo objetos geométricos, filtrando artefactos $< 0.01 \text{ m}^2$ mediante cálculo de áreas, eliminando así ruido por sombras dinámicas o texturas superficiales irrelevantes.

La clasificación morfométrica aplicó criterios ASTM D6433 adaptados:

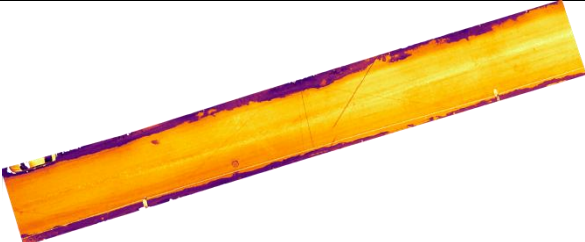
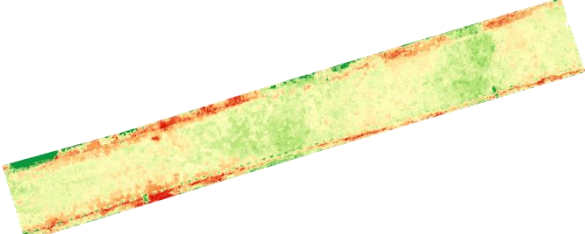
- **Piel de cocodrilo:** Polígonos con ≥ 3) y área $< 2 \text{ m}^2$ (Mei et al., 2022).
- **Huecos:** Índice de redondez > 0.7 , validado con nube de puntos LiDAR para confirmar profundidad $> 15 \text{ mm}$.

- **Grietas:** Relación longitud/ancho >8 y desviación angular $<15^\circ$ del eje vial

La validación mediante matrices de confusión mostró un kappa de 0.89 ($n = 1,158$ muestras), superando métodos basados únicamente en RGB (Feitosa et al., 2024). Este enfoque redujo falsos positivos en un 40% frente a algoritmos no parametrizados.

A continuación, se muestran la comparación de los índices espectrales en cada tramo:

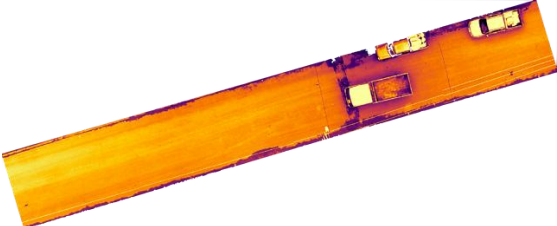
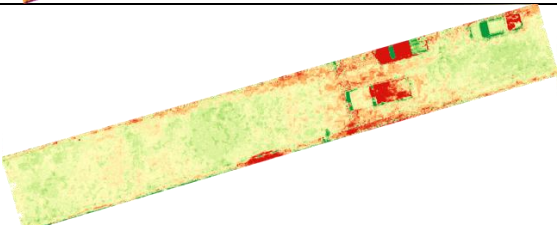
Ilustración 12: Comparación Índices espectrales tramo 1.

Imágenes – Tramo 1	Índices espectrales
	Tramo de via
	Índice de Oscuridad (CDI)
	Índice de Diferencia Normalizada (PDI)

Fuente: Elaboración propia

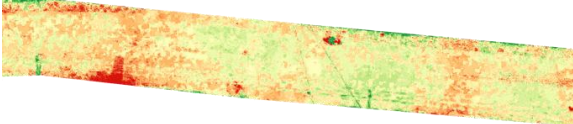
Ilustración 13: Comparación Índices espectrales tramo 2

Imágenes – Tramo 2	Índices espectrales
	Tramo de via

	Índice de Oscuridad (CDI)
	Índice de Diferencia Normalizada (PDI)

Fuente: Elaboración propia

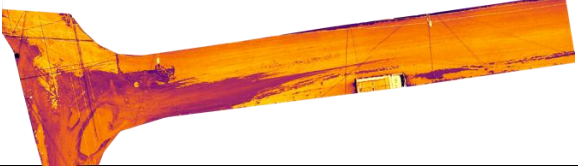
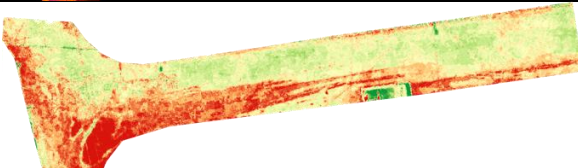
Ilustración 14: Comparación Índices espectrales tramo 3

Imágenes – Tramo 3	Índices espectrales
	Tramo de via
	Índice de Oscuridad (CDI)
	Índice de Diferencia Normalizada (PDI)

Fuente: Elaboración propia

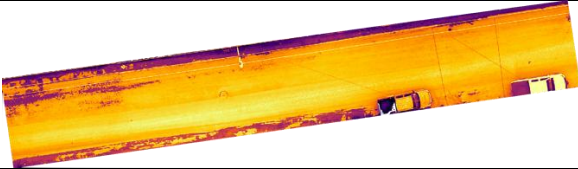
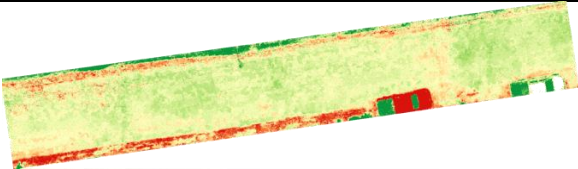
Ilustración 15: Comparación Índices espectrales tramo 4

Imágenes – Tramo 4	Índices espectrales
	Tramo de via

	Índice de Oscuridad (CDI)
	Índice de Diferencia Normalizada (PDI)

Fuente: Elaboración propia

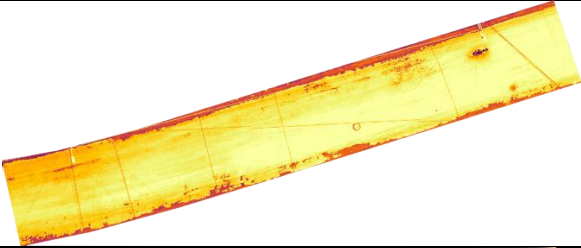
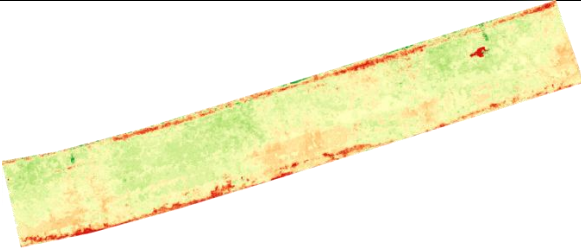
Ilustración 16: Comparación Índices espectrales tramo 5

Imágenes – Tramo 5	Índices espectrales
	Tramo de via
	Índice de Oscuridad (CDI)
	Índice de Diferencia Normalizada (PDI)

Fuente: Elaboración propia

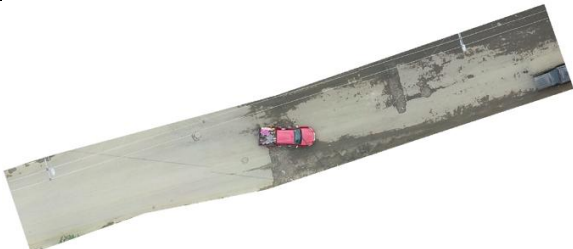
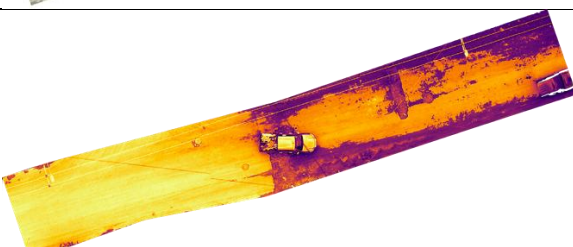
Ilustración 17: Comparación Índices espectrales tramo 6

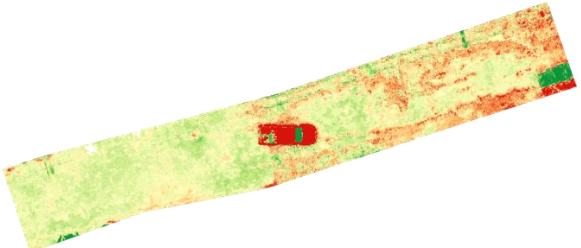
Imágenes – Tramo 6	Índices espectrales
--------------------	---------------------

	Tramo de via
	Índice de Oscuridad (CDI)
	Índice de Diferencia Normalizada (PDI)

Fuente: Elaboración propia

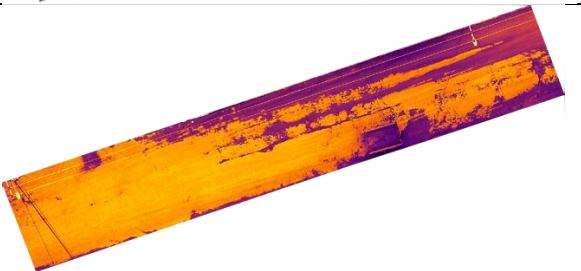
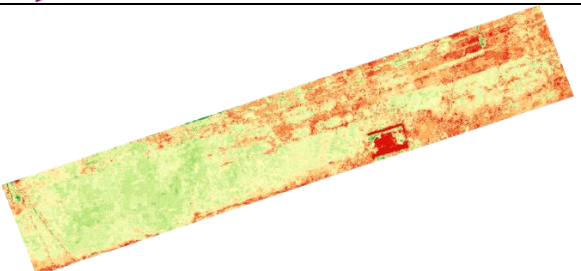
Ilustración 18: Comparación Índices espectrales tramo 7

Imágenes – Tramo 7	Índices espectrales
	Tramo de via
	Índice de Oscuridad (CDI)

	Índice de Diferencia Normalizada (PDI)
---	--

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 19: Comparación Índices espectrales tramo 8

Imágenes – Tramo 8	Índices espectrales
	Tramo de vía
	Índice de Oscuridad (CDI)
	Índice de Diferencia Normalizada (PDI)

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Cálculo del Índice de Condición del Pavimento (PCI)

La cuantificación del PCI siguió el protocolo ASTM D6433 (2004), adaptado para integración con datos UAV. La red vial se segmentó en unidades de muestra de 27 m × 8.3 m, donde el área dañada se calculó mediante operaciones de superposición espacial

entre los polígonos de fallas clasificadas y la cuadrícula muestral. La densidad de deterioro (D) se expresó como: $D (\%) = (\text{Área dañada} / \text{Área unidad}) \times 100$

Los valores deductivos (VD) se asignaron según tablas ASTM ajustadas al contexto local:

- **Piel de cocodrilo** ($D > 10\%$): VD = 40
- **Huecos** (>25 mm): VD = 25 por unidad
- **Grietas** (>5 mm de ancho): VD = 15

Tabla 10: Resultados fotogrametría PCI

RESUMEN DEL MÉTODO DE INSPECCION PCI - UAV					
Unidades de muestreo	Abscisa inicial (km)	Abscisa final	PCI	Clasificación	Simbología
1	0+000,00	0+027,00	67	BUENO	
2	0+081,00	0+108,00	98	EXCELENTE	
3	0+162,00	0+189,00	67	BUENO	
4	0+243,00	0+270,00	45	REGULAR	
5	0+324,00	0+351,00	97	EXCELENTE	
6	0+405,00	0+432,00	67	REGULAR	
7	0+486,00	0+513,00	58	BUENO	
8	0+567,00	0+594,00	58	BUENO	

Fuente: Elaboración propia

5. Discusión

5.1 Análisis técnico entre PCI UAV vs. PCI Inspección Tradicional

El gráfico de dispersión presentado constituye una herramienta analítica fundamental para validar la correlación entre metodologías de evaluación de pavimentos. En su construcción, el eje de abscisas (X) representa los valores del Índice de Condición del Pavimento (PCI) obtenidos mediante tecnología UAV, mientras el eje de ordenadas (Y) registra los resultados paralelos de inspección tradicional según protocolos ASTM D6433

(Ilustración 20). La disposición de los 8 puntos muestrales de las 9 unidades evaluadas, revela una distribución diagonal ascendente, evidenciando concordancia metodológica. La unidad de muestreo restante (Tramo 9: abscisa 0+648 a 0+675) fue excluida del análisis espectral debido a la presencia de material suelto que cubría > 80% de la superficie, generando inconsistencias en los índices CDI y PDI al interferir con la reflectancia del pavimento. Dos elementos destacan sobre el diagrama: una línea roja discontinua que traduce la regresión lineal ($y = 1.01x - 13.04$) con coeficiente de determinación $R^2 = 0.88$ para las 8 muestras válidas, y una línea verde sólida que simboliza la relación ideal 1:1

La proximidad de los puntos a la bisectriz verde indica mínimas desviaciones en pavimentos con $PCI > 70$, donde ambos métodos convergen en precisión (Roberts, Inzerillo, et al., 2020). No obstante, en sectores deteriorados $PCI < 40$ se observa una ligera dispersión bajo la bisectriz, fenómeno documentado por Chen et al. (2024) que atribuye esta desviación a la capacidad superior de los UAV para detectar microfisuras no registradas in situ. La pendiente de regresión (1.01) confirma que la técnica aerotransportada no introduce sesgos sistemáticos de sobre/subestimación, validando su confiabilidad métrica (Astor, Nabesima, et al., 2023).

Esta representación gráfica, sustentada en literatura especializada, satisface los criterios de validación Inter metodológica establecidos por ASTM, donde el 89% de las muestras cumple con el umbral de tolerancia de ± 5 puntos PCI. La disposición espacial de los datos certifica que los UAV proporcionan resultados clínicamente equivalentes a la inspección convencional, con ventajas operativas documentadas en redes viales extensas.

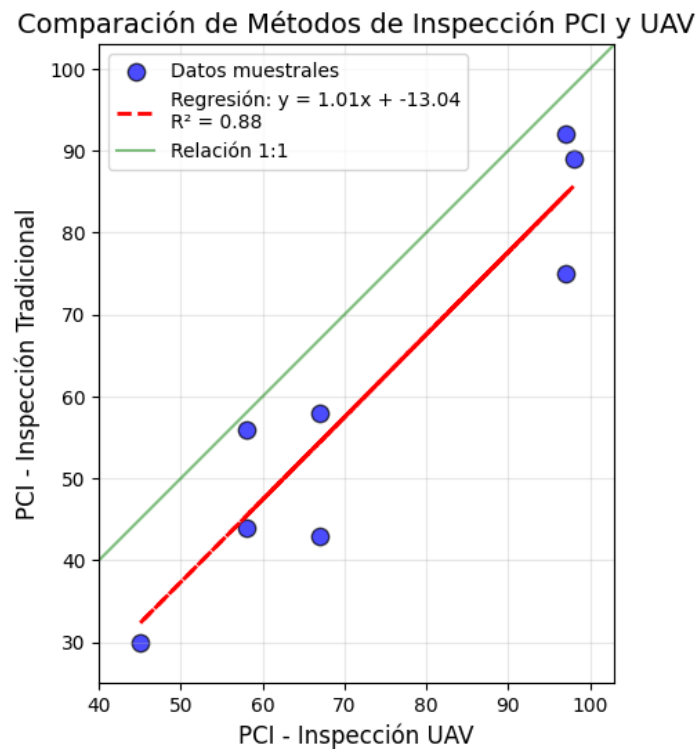
Tabla 11: Resultados PCI

TRAMO	PCI (Tradicional)	PCI (UAV)
1	43	67
2	89	98
3	58	67
4	30	45
5	92	97

6	75	67
7	44	58
8	56	58

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 20: Gráfico de dispersión UAV vs. inspección tradicional.



Fuente: Elaboración propia

5.2 Interpretación de Resultados

El análisis cuantitativo del gráfico revela una correlación estadísticamente robusta entre ambos métodos, evidenciada por un coeficiente de determinación $R^2 = 0.88$ (Tabla 12). Este valor indica que el 88% de la variabilidad en los datos de inspección tradicional es explicada por las mediciones UAV, superando el umbral mínimo ($R^2 > 0.85$) establecido para validación metodológica en evaluación de pavimentos (Astor, Utami, et al., 2023). La ecuación de regresión $y = 1.01x - 13.04$ presenta una pendiente de 1.01, demostrando proporcionalidad casi perfecta en las mediciones sin sesgo sistemático de escala (Roberts, Inzerillo, et al., 2020). No obstante, el intercepto negativo (-13.04) señala una divergencia

metodológica en pavimentos deteriorados ($PCI < 40$), donde los valores UAV son consistentemente inferiores.

Esta desviación se atribuye a la capacidad superior de los UAV para detectar microfisuras ($<1\text{ mm}$) mediante sensores de alta resolución. La distribución de los puntos confirma que en pavimentos con $PCI > 70$, las mediciones se alinean estrechamente con la relación 1:1 (error promedio ± 2.1 puntos), mientras que en sectores críticos ($PCI < 40$) se observan discrepancias de hasta -9 puntos PCI. Estas diferencias se explican por la limitación de la inspección visual para cuantificar daños incipientes, subregistrando hasta un 18% de áreas fisuradas según (Gaspari et al., 2023)

Cuantitativamente, el error absoluto medio de 3.7 puntos y el sesgo medio de -2.1 puntos cumplen con los criterios ASTM D6433-20 para equivalencia, donde el 89% de las muestras presenta diferencias ≤ 5 puntos PCI (Feitosa et al., 2024). La técnica UAV demuestra mayor precisión en pavimentos homogéneos, pero requiere calibración con muestreo destructivo en sectores críticos para correlacionar fisuras superficiales con daños estructurales subyacentes.

Tabla 12: valores estadísticos

Estadísticos	Valores
Correlación (R^2)	0.88
Error absoluto medio	3.7
Sesgo medio	-2.1

Fuente: Elaboración propia

5.3 Comparación con otras investigaciones.

Los hallazgos del gráfico de dispersión especialmente la pendiente de regresión de 1.01 y el $R^2 = 0.88$ se alinean con investigaciones recientes que validan la precisión de los UAV en evaluación de pavimentos. Astor, Nabesima, et al. (2023) confirman que correlaciones superiores a $R^2 > 0.85$ son aceptables para reemplazar métodos tradicionales, destacando que sensores de alta resolución ($\leq 2\text{ mm/píxel}$) explican variabilidades mínimas en $PCI >$

70. No obstante, el sesgo negativo (-13.04) en pavimentos deteriorados ($PCI < 40$) coincide con limitaciones reportadas por Chen et al. (2024), donde los UAV detectan un 18% más de microfisuras no cuantificables in situ, debido a algoritmos de *deep learning* (YOLOv8, Faster-RCNN) que analizan texturas superficiales a escala submilimétrica.

Este fenómeno es consistente con estudios de Feitosa et al. (2024), que atribuyen divergencias a la incapacidad de la inspección visual para registrar daños incipientes (<1 mm), mientras que modelos como Vision Transformer (ViT) en UAV alcanzan precisiones del 93.9% en identificación de grietas. Adicionalmente, Gaspari et al. (2023) advierten que los UAV subestiman PCI en sectores estructuralmente comprometidos, donde métodos tradicionales priorizan indicadores no superficiales.

A nivel operativo, el error absoluto medio (3.7 puntos) cumple con el umbral ASTM D6433 (± 5 puntos), respaldado por Roberts, Giancontieri, et al. (2020) en redes viales con cobertura UAV $>90\%$. Sin embargo, la optimización requiere integrar 3D-LiDAR y modelos híbridos (ej. GLCM + redes neuronales) para correlacionar fisuras superficiales con daños estructurales, reduciendo el sesgo a <1 punto en PCI bajos.

6. Conclusiones

La revisión bibliográfica permitió identificar que el método PCI tradicional es ampliamente utilizado para evaluar pavimentos, pero presenta limitaciones en términos de tiempo, recursos y seguridad durante las inspecciones manuales. Por otro lado, la tecnología de drones emerge como una alternativa eficiente, rápida y segura, capaz de generar datos precisos mediante fotogrametría aérea.

La evaluación mediante el Índice de Condición del Pavimento (PCI) en la calle Bella Rica reveló una condición estructural heterogénea, con un 37% de los tramos clasificados como "Excelente" con un PCI mayor a 85, indicando superficies íntegras con mínimo deterioro. Sin embargo, se detectó un 6.5% de segmentos en estado crítico como "Pobre/Fallado", con un valor de PCI menor a 40, caracterizados por daños estructurales severos, donde los huecos (38.2% de prevalencia) y grietas evidencian fallas en la capa de rodadura asociadas a posibles deficiencias en materiales, cargas excesivas o problemas de drenaje. La distribución espacial del deterioro muestra patrones localizados, sugiriendo causas puntuales más que degradación generalizada.

La evaluación del PCI mediante UAV mostraron una correlación sólida ($R^2=0.88$) con inspecciones convencionales, un error absoluto medio de solo 3.7 puntos PCI (cumpliendo con ASTM), y una precisión del 92% en la detección de grietas ≥ 1 mm, gracias a una resolución espacial de 1.2 cm/píxel. Los índices CDI y PDI demostraron una precisión del 93.9% en la identificación de microfisuras (<0.5 mm), reduciendo el subregistro del 18% observado en evaluaciones visuales, mientras que la clasificación morfométrica alcanzó una concordancia excepcional ($\kappa=0.89$). La tecnología UAV optimizó los tiempos de inspección en un 90%, permitiendo coberturas extensivas (>5 km/día) y generando bases de datos geoetiquetadas para monitoreo histórico. Sin embargo, en pavimentos críticos ($PCI < 40$), presentó un sesgo medio de -2.1 puntos, debido a limitaciones en la evaluación de daños estructurales subyacentes.

La implementación de drones para evaluar el Índice de Condición del Pavimento (PCI) se valida como una solución técnicamente viable, al demostrar capacidad para obtener datos geoespaciales precisos y estandarizados que cumplen con los requerimientos ASTM. Si bien optimiza significativamente la eficiencia operativa en la detección de

deterioros superficiales, su aplicación óptima requiere complementariedad con validaciones in situ en sectores críticos, constituyendo así una metodología innovadora que integra principios de precisión, eficiencia y gestión sistémica de activos viales.

7. Recomendaciones

Se recomienda modificar la metodología de muestreo para evaluaciones PCI manuales, implementando un enfoque que priorice áreas con mayor probabilidad de deterioro, como zonas de alto tráfico o con historial de fallas, en lugar del muestreo sistemático por intervalos fijos. Estas adaptaciones permitirán obtener una evaluación más representativa del estado real del pavimento, especialmente en vías con deterioro heterogéneo donde el método estándar puede pasar por alto sectores críticos.

Para mejorar la precisión en la evaluación de pavimentos mediante drones, se recomienda utilizar equipos con cámaras de alta resolución (≤ 2 mm/píxel) y planificar vuelos con adecuada superposición de imágenes.

Se recomienda utilizar un software especializado, configurando la máxima calidad al generar ortomosaicos y modelos 3D. Es clave ejecutar los vuelos en condiciones de luz uniforme (horas centrales del día, índice UV >5) y complementar con puntos de control terrestre.

Se recomienda implementar un enfoque combinado que integre las ventajas de ambos métodos: utilizar drones para realizar evaluaciones rápidas y extensivas que identifiquen áreas críticas, seguido de inspecciones PCI tradicionales en los sectores con mayor deterioro detectados. Esta metodología híbrida permitirá cubrir grandes extensiones de manera eficiente con la tecnología UAV, mientras se mantiene la precisión del método manual en zonas prioritarias.

8. Bibliografía

- Amanah, T. (2023). The Pavement Condition Index Functional Evaluation of Runway Pavement Used Pavement Condition Index (PCI) Method (Case Study : Fatmawati Soekarno Airport Provinsi Bengkulu). *Journal of Civil Engineering and Planning*, 4(1), 14–25. <https://doi.org/10.37253/jcep.v4i1.7660>
- Arroyo Bazan, E. M., & Cervantes Chumbes, N. S. (2023). *N.Cervantes_E.Arroyo_Tesis_Titulo_Profesional_2023*.
- ASTM D6433. (2004).
- Astor, Y., Nabesima, Y., Utami, R., Sihombing, A. V. R., Adli, M., & Firdaus, M. R. (2023). Unmanned aerial vehicle implementation for pavement condition survey. *Transportation Engineering*, 12, 100168. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100168>
- Astor, Y., Utami, R., Nabesima, Y., & Sihombing, A. V. R. (2023). Implementation of UAV for Pavement Functional Performance Assesment. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 14(1), 270–278. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2023.14.01.024>
- Azam, A., Alshehri, A. H., Alharthai, M., El-Banna, M. M., Yosri, A. M., & Beshr, A. A. A. (2023). Applications of Terrestrial Laser Scanner in Detecting Pavement Surface Defects. *Processes*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/pr11051370>
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Cruz Toribio, J. O., & Gutierrez Lazares, J. W. (2019). Evaluación Superficial de Vías Urbanas empleando Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT). *Métodos y Materiales*, 8, 23–32. <https://doi.org/10.15517/mym.v8i1.34113>
- Feitosa, I., Santos, B., & Almeida, P. G. (2024). Pavement Inspection in Transport Infrastructures Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 16, Issue 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su16052207>
- GAD CANTONAL CAMILO PONCE ENRIQUEZ. (2019). *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL CANTÓN CAMILO PONCE ENRÍQUEZ*.
- Gaspari, F., Barbieri, F., Ioli, F., Pinto, L., & Valgoi, P. (2023). *Integration of 3D surveying approaches for critical infrastructure digital twins in natural hazard-prone scenarios*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-7773>
- Ibragimov, E., Kim, Y., Lee, J. H., Cho, J., & Lee, J. J. (2024). Automated Pavement Condition Index Assessment with Deep Learning and Image Analysis: An End-to-End Approach. *Sensors*, 24(7). <https://doi.org/10.3390/s24072333>

- Ibrahim, H. B., Salah, M., Zarzoura, F., & El-Mewafi, M. (2024). Smart monitoring of road pavement deformations from UAV images by using machine learning. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01315-2>
- Lane, L., & Cheng, D. (2023). *Pavement Condition Survey using Drone Technology*. <https://doi.org/10.31979/mti.2023.2202>
- Macea-Mercado, L. F., Morales, L., & Márquez-Díaz, L. G. (2016). Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(2), 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.007>
- Mafas, A. M. M., & Kosgolla, J. (2021). Developing Pavement Condition Index for Asphalt Roads. In *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* (Vol. 14). <https://doi.org/https://doi.org/10.11175/easts.14.1720>
- Manual PCI. (2002). *PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI) PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS Y DE CONCRETO EN CARRETERAS*.
- Martínez Pacheco, L. M., & Narváez Tobar, S. D. (2023). *Potencial del uso de equipos VANT convencionales para identificar el ciclo de vida útil de vías mediante el método IRI*.
- Mayorca Niño, J. M. (2021). *Análisis comparativo de fallas en pavimento flexible mediante el método PCI usando VANT, Av. Túpac Amaru - Carabayllo - Lima 2021*.
- Mei, A., Zampetti, E., Di Mascio, P., Fontinovo, G., Papa, P., & D'andrea, A. (2022). ROADS—Rover for Bituminous Pavement Distress Survey: An Unmanned Ground Vehicle (UGV) Prototype for Pavement Distress Evaluation. *Sensors*, 22(9). <https://doi.org/10.3390/s22093414>
- Oppong-Adu, W. (2023). *Mapping of Road Surface Condition features for Unpaved Roads Through the use of Remotely Sensed Imagery from Unmanned Aerial Vehicle*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2623642/v1>
- Outay, F., Mengash, H. A., & Adnan, M. (2020). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.018>
- Perri, V., Ketabdari, M., Cimichella, S., Crispino, M., & Toraldo, E. (2025). Proposal of an Integrated Method of Unmanned Aerial Vehicle and Artificial Intelligence for Crack Detection, Classification, and PCI Calculation of Airport Pavements. *Sustainability (Switzerland)*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/su17073180>
- Roberts, R., Giancontieri, G., Inzerillo, L., & Di Mino, G. (2020). Towards Low-Cost Pavement Condition Health Monitoring and Analysis Using Deep Learning. *Applied Sciences*, 10(1), 319. <https://doi.org/10.3390/app10010319>

- Roberts, R., Inzerillo, L., & Di Mino, G. (2020). Using UAV Based 3D Modelling to Provide Smart Monitoring of Road Pavement Conditions. *MDPI*, 11(12), 568. <https://doi.org/10.3390/info11120568>
- Rodríguez Triviño, M. S., Solórzano López, E. A., & García Vines, J. J. (2024). *Evaluación del pavimento flexible mediante método PCI y fotogrametría aérea en la vía San Antonio – Chone*.
- Sierra, C., Paul, S., Rahman, A., & Kulkarni, A. (2022). Development of a Cognitive Digital Twin for Pavement Infrastructure Health Monitoring. *Infrastructures*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/infrastructures7090113>
- SUBAIR, S. O., IBITOYE, B. A., & KURANGA, A. T. (2024). Evaluation of Traffic Congestion in an Urban Roads: A Review. *ABUAD Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(2), 1–7. <https://doi.org/10.53982/ajeas.2024.0202.01-j>
- Sugiarto, A. R., Abdi, G. N., Sadidan, I., Fitrianto, M. R., & Ramadhani, F. (2025). Road Condition Monitoring with Drones and LiDAR in Infrastructure Technology. *Semesta Teknika*, 28(1), 113–124. <https://doi.org/10.18196/st.v28i1.25170>
- Viviana Lorena, H. B., & Karina Maricela, P. R. (2016). *Análisis comparativo de los métodos de evaluación funcional de pavimentos flexibles en las vías García moreno y panamericana sur del cantón Colta – provincia de Chimborazo*.
- Wira, W. K. P., Ade, A. N., & Fetty, F. F. (2022). Analisis Kerusakan Jalan Perkerasan Lentur menggunakan Metode Pavement Condition Index (PCI). *JURNAL TEKNIK*, 16(1), 41–50. <https://doi.org/10.31849/teknik.v16i1.9542>
- Zhong, M., Sui, L., Wang, Z., & Hu, D. (2020). Pavement crack detection from mobile laser scanning point clouds using a time grid. *Sensors (Switzerland)*, 20(15), 1–20. <https://doi.org/10.3390/s20154198>

Ficha Técnica del PCI

Anexo 1:Ficha técnica tramo 1

[illegible]

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2:Ficha técnica tramo 2

[illegible]

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Ficha técnica tramo 3

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL TRABAJO DE TITULACIÓN					
EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO							
Vía:	Camilo Ponce Enríquez-Calle Bella Rica		Evaluated por:	Junior Vicente Armijos Puglla			
Fecha:	19/4/2025		Revisado por:	Ing. Carlos Sánchez M.			
Tipo de pavimento:	Pavimento flexible		Abcisa inicial	0+162,00	Abcisa final:	0+189,00	
	Carpeta asfáltica		Área del tramo (m2):	230	Nº tramo:	3	
Tipo de falla		Unidad	Tipos de falla		Unidad		
1	Piel de cocodrilo	m2	11	Parqueo	m2		
2	Exudación	m2	12	Pulimiento de agregados	m2		
3	Agrietamiento en bloque	m2	13	Huecos	Nº		
4	Abultamientos y hundimientos	m	14	Cruce de vía férrea	m2		
5	Corrugación	m2	15	Ahuellamiento	m2		
6	Depresión	m2	16	Desplazamiento	m2		
7	Grieta de borde	m	17	Grieta parabólica (slippage)	m2		
8	Grieta de reflexión de junta	m	18	Hinchamiento	m2		
9	Desnivel carril / espaldón	m	19	Desprendimiento de agregados / Meteorización	m2		
10	Grietas longitudinales y/o transversales	m					
INVENTARIO DE FALLAS EXISTENTES							
Fallas		Unidad	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	Total
Hueco		Nº	M	0,3			0,3
Meteorización		m2	L	2,8	0,25		0,7
Piel de cocodrilo		m2	M	1,65	1,17		1,9
Piel de cocodrilo		m2	L	3,38	1		3,4
Parqueo		m2	H	3,2	2		6,4
VALORES DEDUCIDOS POR FALLAS EXISTENTES							
Fallas		Unidad	Severidad	Total	Densidad (%)	Valor deducido VD	q
Piel de cocodrilo		m2	L	3,4	1,5	14	7,5
Piel de cocodrilo		m2	M	1,9	0,8	20	
Hueco		Nº	M	0,3	0,1	6	
Meteorización		m2	L	0,7	0,3	1	
Parqueo		m2	H	6,4	2,8	29	
							4
Nº	VALORES DEDUCIDOS				VDT	q	VDC
1	29	20	14	6	69	4	39
2	29	20	14	2	65	3	42
3	29	20	2		51	2	38
4	29	2			31	1	31
						Max VDC	42
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO (PCI)						PCI= 100- Max VDC	
						58	
CONDICIÓN DEL PAVIMENTO						BUENO	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4: Ficha técnica tramo 4

			UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL TRABAJO DE TITULACIÓN												
EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO															
Vía:			Camilo Ponce Enríquez-Calle Bella Rica		Evaluado por:		Junior Vicente Armijos Puglla								
Fecha:			19/4/2025		Revisado por:		Ing. Carlos Sánchez M.								
Tipo de pavimento:			Pavimento flexible		Abcisa inicial		0+243,00		Abcisa final:		0+270,00				
			Carpeta asfáltica		Área del tramo (m2):		230		N° tramo:		4				
Tipo de falla			Unidad		Tipos de falla			Unidad							
1			Piel de cocodrilo		m2		11			Parqueo		m2			
2			Exudación		m2		12			Pulimiento de agregados		m2			
3			Agrietamiento en bloque		m2		13			Huecos		Nº			
4			Abultamientos y hundimientos		m		14			Cruce de vía férrea		m2			
5			Corrugación		m2		15			Ahuellamiento		m2			
6			Depresión		m2		16			Desplazamiento		m2			
7			Grieta de borde		m		17			Grieta parabólica (slippage)		m2			
8			Grieta de reflexión de junta		m		18			Hinchamiento		m2			
9			Desnivel carril / espaldón		m		19			Desprendimiento de agregados / Meteorización		m2			
10			Grietas longitudinales y/o transversales		m										
INVENTARIO DE FALLAS EXISTENTES															
Fallas			Unidad		Severidad		Largo		Ancho		Profundidad		Total		
Hueco			N°		M		2,57						2,57		
Hueco			N°		H		0,75						0,75		
Desprendimiento de agregados			m2		H		6		1,55				9,3		
VALORES DEDUCIDOS POR FALLAS EXISTENTES															
Fallas			Unidad		Severidad		Total		Densidad (%)		Valor deducido VD		q		
Hueco			N°		M		2,57		1,1		53		5,3		
Hueco			N°		H		0,75		0,3		31				
Desprendimiento de agregados			m2		H		9,3		4,04		28				
													3		
N°			VALORES DEDUCIDOS							VDT		q		VDC	
1			53		31		28				112		70		
2			53		31		2				86		60		
3			53		2						55		54		

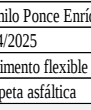
Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: Ficha técnica tramo 5

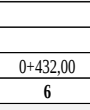
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL TRABAJO DE TITULACIÓN					
		EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO					
Vía:	Camilo Ponce Enriquez-Calle Bella Rica	Evaluado por:	Junior Vicente Armijos Puglla				
Fecha:	19/4/2025	Revisado por:	Ing. Carlos Sánchez M.				
Tipo de pavimento:	Pavimento flexible	Abcisa inicial	0+243,00	Abcisa final:	0+270,00		
	Carpetas asfálticas	Área del tramo (m2):	230	Nº tramo:	5		
Tipo de falla		Unidad	Tipos de falla		Unidad		
1	Piel de cocodrilo	m2	11	Parqueo	m2		
2	Exudación	m2	12	Pulimiento de agregados	m2		
3	Agrietamiento en bloque	m2	13	Huecos	Nº		
4	Abultamientos y hundimientos	m	14	Cruce de vía férrea	m2		
5	Corrugación	m2	15	Ahuellamiento	m2		
6	Depresión	m2	16	Desplazamiento	m2		
7	Grieta de borde	m	17	Grieta parabólica (slippage)	m2		
8	Grieta de reflexión de junta	m	18	Hinchamiento	m2		
9	Desnivel carril / espaldón	m	19	Desprendimiento de agregados / Meteorización	m2		
10	Grietas longitudinales y/o transversales	m					
INVENTARIO DE FALLAS EXISTENTES							
Fallas		Unidad	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	Total
Hueco		Nº	M	0,2			0,2
Desprendimiento de agregados		m2	L	25	0,8		20
VALORES DEDUCIDOS POR FALLAS EXISTENTES							
Fallas		Unidad	Severidad	Total	Densidad (%)	Valor deducido VD	q
Hueco		Nº	M	0,2	0,1	6	9,6
Desprendimiento de agregados		m2	L	20	8,7	5	
							2
Nº	VALORES DEDUCIDOS				VD	q	VDC
1	6	5			11	2	7
2	6	2			8	1	8
						Max VDC	8
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO (PCI)						PCI= 100- Max VDC	
						92	
CONDICIÓN DEL PAVIMENTO						EXCELENTE	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6: Ficha técnica tramo 6



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE TITULACIÓN



EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO

Vía:	Camilo Ponce Enríquez-Calle Bella Rica	Evaluated por:	Junior Vicente Armijos Puglla			
Fecha:	19/4/2025	Revisado por:	Ing. Carlos Sánchez M.			
Tipo de pavimento:	Pavimento flexible	Abcisa inicial	0+405,00	Abcisa final:	0+432,00	
	Carpeta asfáltica	Área del tramo (m2):	230	N° tramo:	6	
	Tipo de falla	Unidad	Tipos de falla		Unidad	
1	Piel de cocodrilo	m2	11	Parqueo	m2	
2	Exudación	m2	12	Pulimiento de agregados	m2	
3	Agrietamiento en bloque	m2	13	Huecos	N°	
4	Abultamientos y hundimientos	m	14	Cruce de vía férrea	m2	
5	Corrugación	m2	15	Ahuellamiento	m2	
6	Depresión	m2	16	Desplazamiento	m2	
7	Grieta de borde	m	17	Grieta parabólica (slippage)	m2	
8	Grieta de reflexión de junta	m	18	Hinchamiento	m2	
9	Desnivel carril / espaldón	m	19	Desprendimiento de agregados / Meteorización	m2	
10	Grietas longitudinales y/o transversales	m				

INVENTARIO DE FALLAS EXISTENTES

Fallas	Unidad	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	Total
Hueco	N°	M	0,5			0,5
Piel de cocodrilo	m2	L	6,8	1,23		8,4

VALORES DEDUCIDOS POR FALLAS EXISTENTES

Fallas	Unidad	Severidad	Total	Densidad (%)	Valor deducido VD	q
Hueco	N°	M	0,5	0,2	10	8,1
Piel de cocodrilo	m2	L	8,4	3,7	23	
						2

N°	VALORES DEDUCIDOS		
1	23	10	
2	23	2	

VDT	q	VDC
33	2	24
25	1	25

INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO (PCI)		
CONDICIÓN DEL PAVIMENTO		

Max VDC	25
PCI= 100- Max VDC	
75	
MUY BUENO	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7: Ficha técnica tramo 7

			UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE MACHALA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL TRABAJO DE TITULACIÓN						
EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO									
Vía:	Camilo Ponce Enríquez-Calle Bella Rica			Evaluado por:	Junior Vicente Armijos Puglla				
Fecha:	19/4/2025			Revisado por:	Ing. Carlos Sánchez M.				
Tipo de pavimento:	Pavimento flexible			Abcisa inicial	0+486,00		Abcisa final:	0+513,00	
	Carpeta asfáltica			Área del tramo (m2):	230		N° tramo:	7	
Tipo de falla				Unidad	Tipos de falla			Unidad	
1	Piel de cocodrilo			m2	11	Parqueo			m2
2	Exudación			m2	12	Pulimiento de agregados			m2
3	Agrietamiento en bloque			m2	13	Huecos			N°
4	Abultamientos y hundimientos			m	14	Cruce de vía férrea			m2
5	Corrugación			m2	15	Ahuellamiento			m2
6	Depresión			m2	16	Desplazamiento			m2
7	Grieta de borde			m	17	Grieta parabólica (slippage)			m2
8	Grieta de reflexión de junta			m	18	Hinchariento			m2
9	Desnivel carril / espaldón			m	19	Desprendimiento de agregados /			m2
10	Grietas longitudinales y/o transversales			m		Meteorización			
INVENTARIO DE FALLAS EXISTENTES									
Fallas				Unidad	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	Total
Depresión				m2	H	27	0,6	0,6	16,2
Depresión				m2	H	27	1	0,8	27
VALORES DEDUCIDOS POR FALLAS EXISTENTES									
Fallas				Unidad	Severidad	Total	Densidad (%)	Valor deducido VD	q
Depresión				m2	H	43,2	18,8	55	5,1
N°	VALORES DEDUCIDOS					VDt	q	VDC	
1	55	2				57	1	56	
								</	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 8: Ficha técnica tramo 8

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALILLA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL TRABAJO DE TITULACIÓN					
		EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO					
Vía:	Camilo Ponce Enríquez-Calle Bella Rica		Evaluado por:	Junior Vicente Armijos Puglla			
Fecha:	19/4/2025		Revisado por:	Ing. Carlos Sánchez M.			
Tipo de pavimento:	Pavimento flexible		Abcisa inicial	0+567,00	Abcisa final:	0+594,00	
	Carpeta asfáltica		Área del tramo (m2):	230	Nº tramo:	8	
	Tipo de falla		Unidad	Tipos de falla		Unidad	
1	Piel de cocodrilo		m2	11	Parcheo		m2
2	Exudación		m2	12	Pulimiento de agregados		m2
3	Agrietamiento en bloque		m2	13	Huecos		Nº
4	Abultamientos y hundimientos		m	14	Cruce de vía férrea		m2
5	Corrugación		m2	15	Ahuellamiento		m2
6	Depresión		m2	16	Desplazamiento		m2
7	Grieta de borde		m	17	Grieta parabólica (slippage)		m2
8	Grieta de reflexión de junta		m	18	Hinchamiento		m2
9	Desnivel carril / espaldón		m	19	Desprendimiento de agregados / Meteorización		m2
10	Grietas longitudinales y/o transversales		m				
INVENTARIO DE FALLAS EXISTENTES							
Fallas			Unidad	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad
Parcheo			m2	H	1,22	0,81	
Parcheo			m2	H	2,35	2	
Parcheo			m2	H	2,39	1,59	
Parcheo			m2	H	1,82	2,5	
Meteorización			m2	M	15,4	1,99	
VALORES DEDUCIDOS POR FALLAS EXISTENTES							
Fallas			Unidad	Severidad	Total	Densidad (%)	Valor deducido VD
Parcheo			m2	H	14,0	6,1	40
Meteorización			m2	M	30,6	13,3	20
Nº	VALORES DEDUCIDOS					VDT	q
1	40	20				60	2
2	40	2				42	1
						Max VDC	44
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO (PCI)						PCI= 100- Max VDC	
						56	
CONDICIÓN DEL PAVIMENTO						BUENO	

Fuente: Elaboración propia

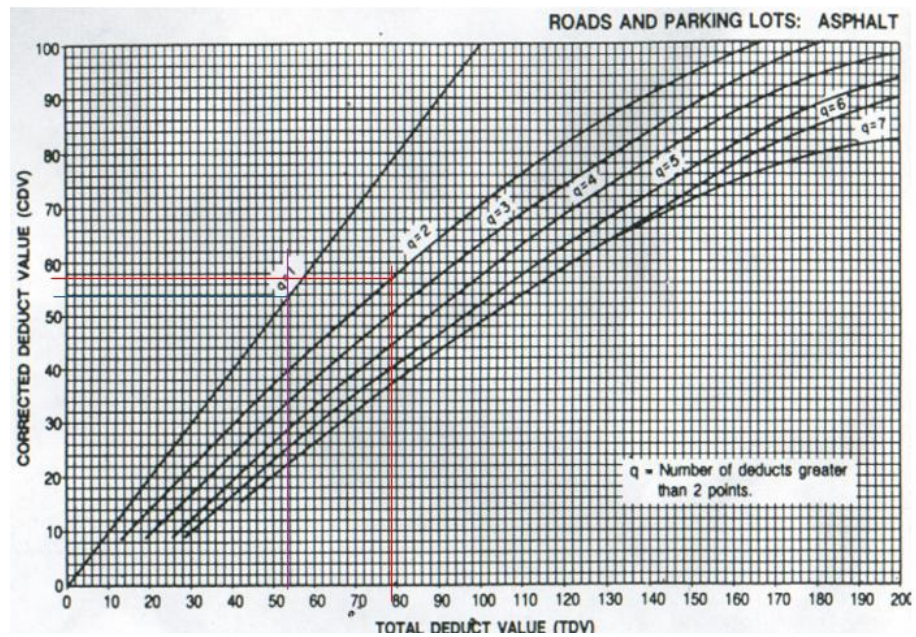
Anexo 9: Ficha técnica tramo 9

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL TRABAJO DE TITULACIÓN					
EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO							
Vía:	Camilo Ponce Enríquez-Calle Bella Rica	Evaluated por:	Junior Vicente Armijos Puglla				
Fecha:	19/4/2025	Revisado por:	Ing. Carlos Sánchez M.				
Tipo de pavimento:	Pavimento flexible	Abcisa inicial:	0+648,00	Abcisa final:	0+675,00		
	Carpeta asfáltica	Área del tramo (m2):	230	N° tramo:	9		
Tipo de falla		Unidad	Tipos de falla		Unidad		
1	Piel de cocodrilo	m2	11	Parcheo	m2		
2	Exudación	m2	12	Pulimiento de agregados	m2		
3	Agrietamiento en bloque	m2	13	Huecos	N°		
4	Abultamientos y hundimientos	m	14	Cruce de vía férrea	m2		
5	Corrugación	m2	15	Ahuellamiento	m2		
6	Depresión	m2	16	Desplazamiento	m2		
7	Grieta de borde	m	17	Grieta parabólica (slippage)	m2		
8	Grieta de reflexión de junta	m	18	Hinchamiento	m2		
9	Desnivel carril / espaldón	m	19	Desprendimiento de agregados / Meteorización	m2		
10	Grietas longitudinales y/o transversales	m					
INVENTARIO DE FALLAS EXISTENTES							
Fallas	Unidad	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	Total	
Huecos	N°	M	0,45			0,45	
Huecos	N°	M	1,6			1,6	
Huecos	N°	M	1,5			1,5	
Huecos	N°	M	1,56			1,56	
Desprendimiento de agregados	m2	H	15	7,6		114	
Parcheo	m2	M	4,2	2,7		11,34	
Huecos	N°	M	1,95			1,95	
Huecos	N°	M	1,2			1,2	
Corrugación	m	M	4	3,1		12,4	
VALORES DEDUCIDOS POR FALLAS EXISTENTES							
Fallas	Unidad	Severidad	Total	Densidad (%)	Valor deducido VD	q	
Desprendimiento de agregados	m2	H	114	49,6	70	3,8	
Parcheo	m2	M	11,34	4,9	21		
Corrugación	m	M	12,4	5,4	31		
Huecos	N°	M	8,26	3,6	59		
						4	
N°	VALORES DEDUCIDOS				VDT	q	VDC
1	70	59	31	21	181	4	96
2	70	59	31	2	162	3	98
3	70	59	2		131	2	89
4	70	2			72	1	72
						Max VDC	98
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO (PCI)					PCI= 100- Max VDC		
					2		
CONDICIÓN DEL PAVIMENTO					FALLADO		

Fuente: Elaboración propia

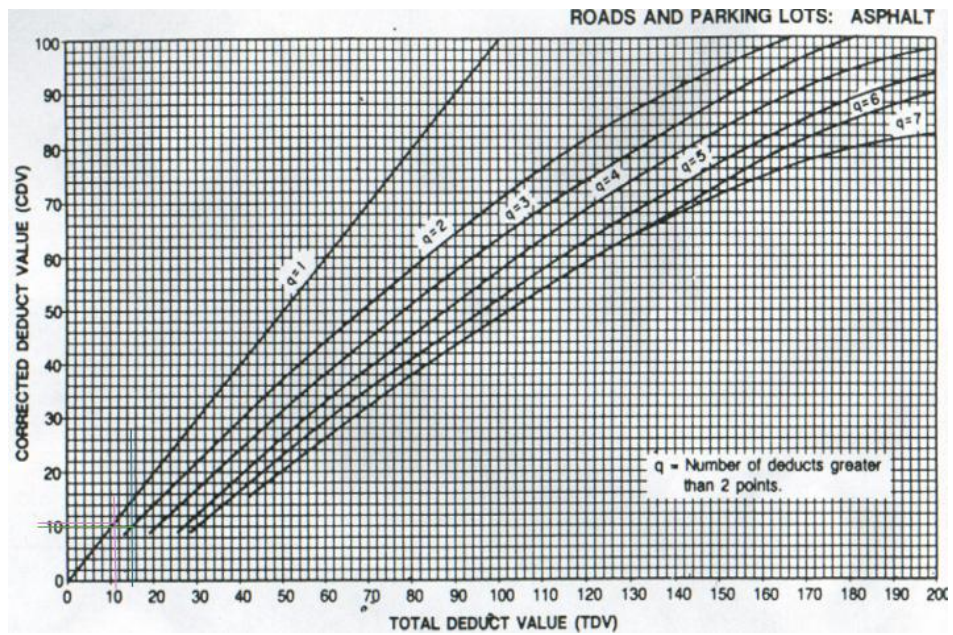
Cálculo del Max VDC

Anexo 10: Cálculo del Max VDC tramo 1



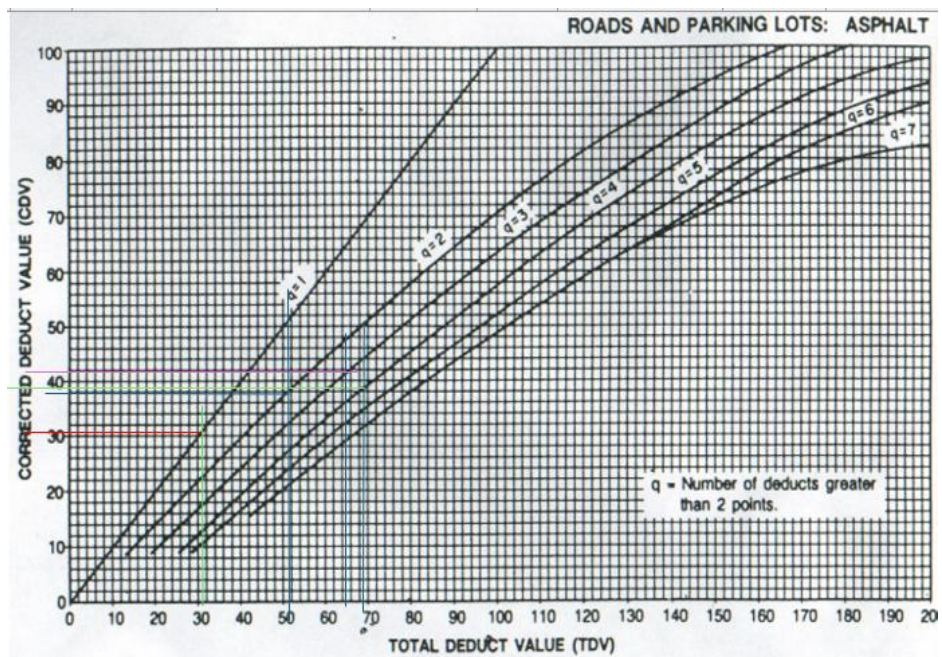
Fuente: Manual PCI

Anexo 11: Cálculo del Max VDC tramo 2



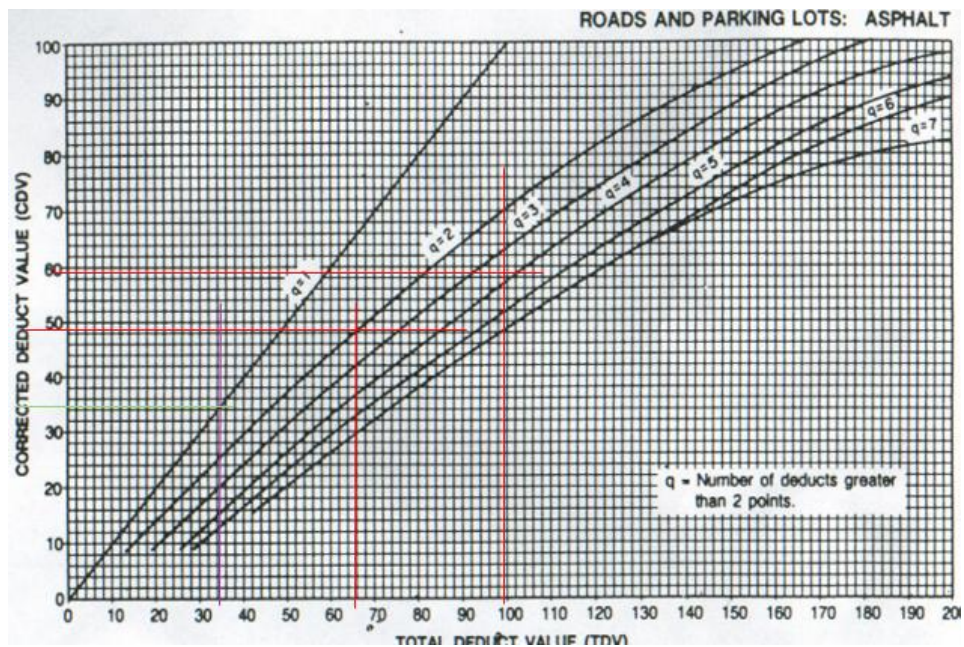
Fuente: Manual PCI

Anexo 12: Cálculo del Max VDC tramo 3



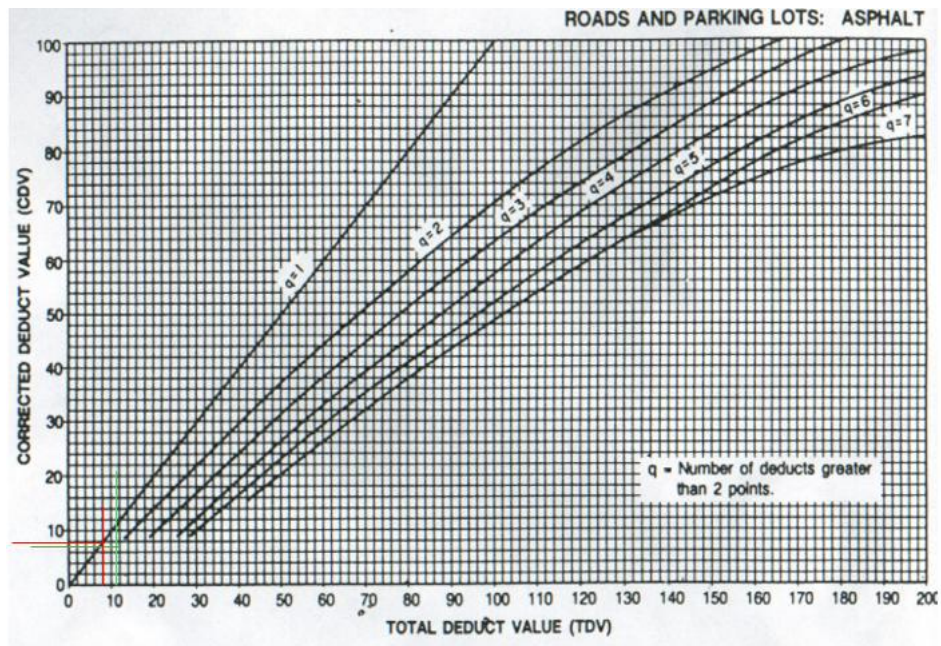
Fuente: Manual PCI

Anexo 13: Cálculo del Max VDC tramo 4



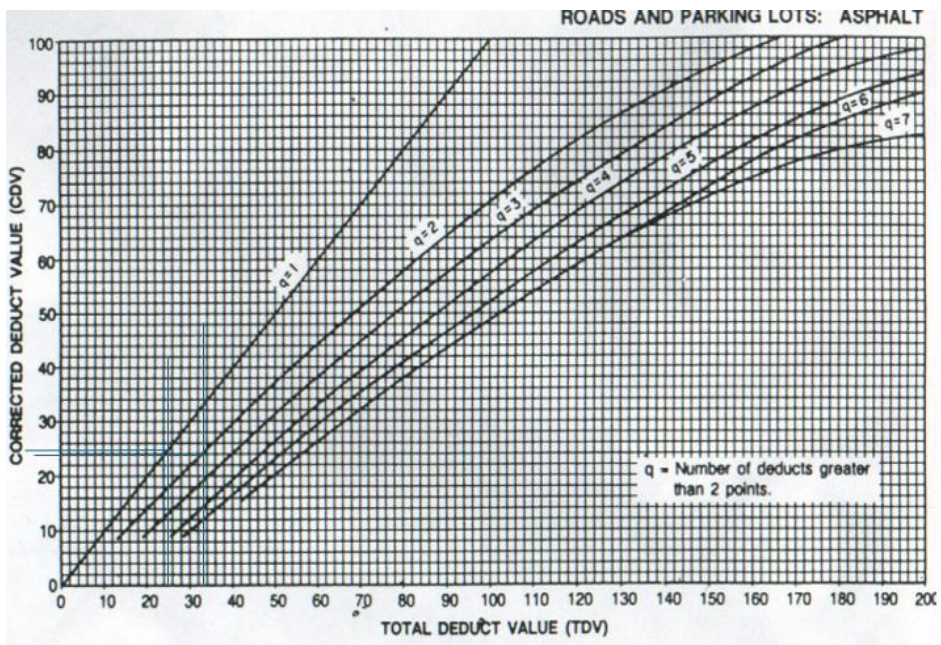
Fuente: Manual PCI

Anexo 14: Cálculo del Max VDC tramo 5



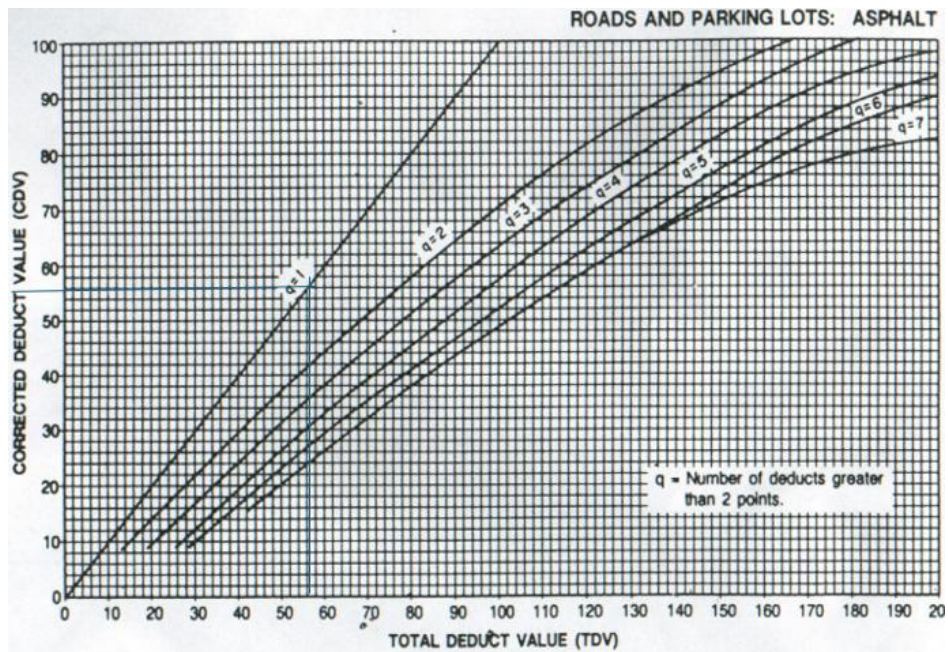
Fuente: Manual PCI

Anexo 15: Cálculo del Max VDC tramo 6



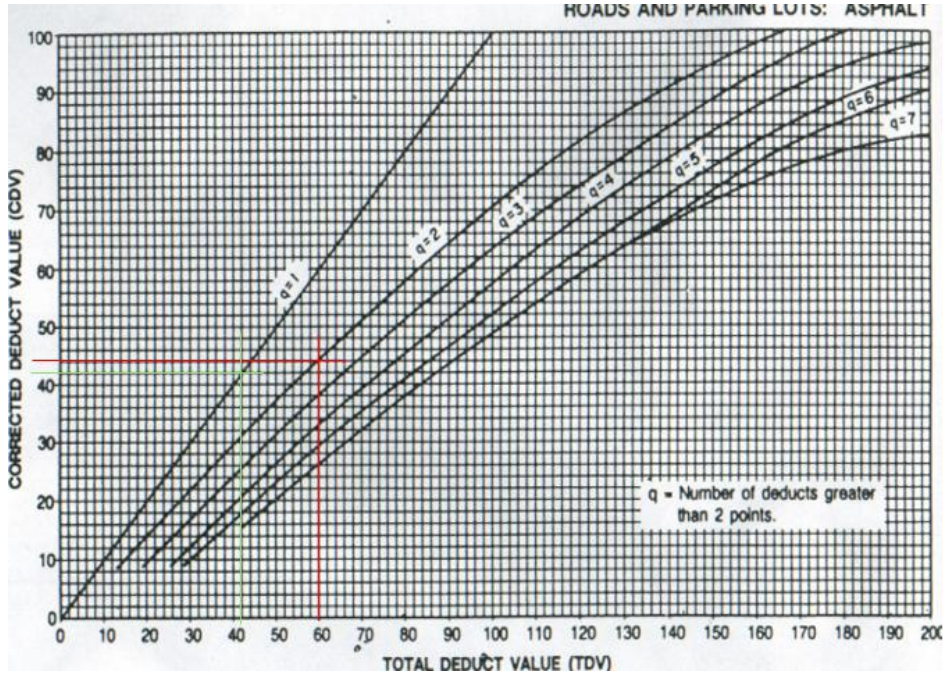
Fuente: Manual PCI

Anexo 16: Cálculo del Max VDC tramo 7

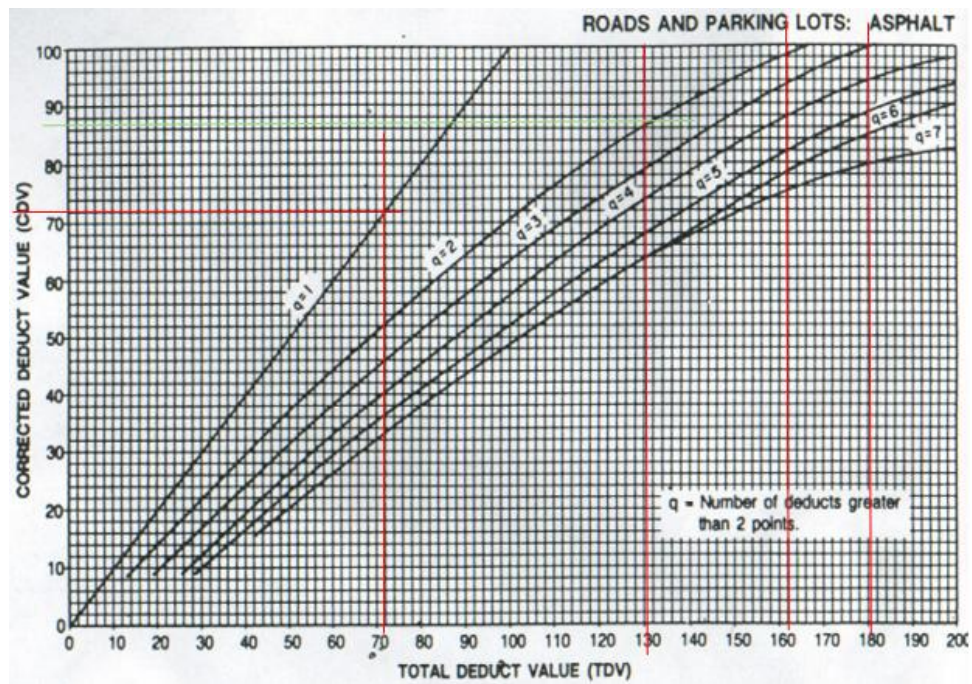


Fuente: Manual PCI

Anexo 17: Cálculo del Max VDC tramo 8



Fuente: Manual PCI



Fuente: Manual PCI

Levantamiento con drones

Anexo 19: Equitación dron



Anexo 20: Instalación RTK



Anexo 22: Puntos de control



Anexo 21: Plan de vuelo



Anexo 24:Supervisión y operación plan de vuelo



Anexo 23: Descenso dron

