

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**“INTEGRACIÓN Y APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SOFT COMPUTING  
(FAHP Y FWA) PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO EN 5  
TRAMOS DE LA CARRETERA CA-1071 EN EL CENTRO POBLADO DE TARTAR  
CHICO, DISTRITO DE LOS BAÑOS DEL INCA, DEPARTAMENTO DE  
CAJAMARCA”**

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR:**

Bach. MIRELLA LISBETH SÁNCHEZ CHUCCHUCÁN

**ASESOR:**

M en I. Ing. JOSÉ BENJAMÍN TORRES TAFUR

**CAJAMARCA - PERÚ**

**2025**

## **CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD**

### **FACULTAD DE INGENIERÍA**

**1. Investigador:** MIRELLA LISBETH SÁNCHEZ CHUCCHUCÁN

DNI: 74894298

Escuela Profesional: INGENIERÍA CIVIL

**2. Asesor:** M en I. Ing. JOSÉ BENJAMÍN TORRES TAFUR

Facultad: INGENIERÍA

**3. Grado académico o título profesional**

Bachiller

Título profesional

Segunda especialidad

Maestro

Doctor

**4. Tipo de Investigación:**

Tesis

Trabajo de investigación

Trabajo de suficiencia profesional

Trabajo académico

**5. Título de Trabajo de Investigación:**

"INTEGRACIÓN Y APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SOFT COMPUTING (FAHP Y FWA) PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO EN 5 TRAMOS DE LA CARRETERA CA-1071 EN EL CENTRO POBLADO DE TARTAR CHICO, DISTRITO DE LOS BAÑOS DEL INCA, DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA"

**6. Fecha de evaluación:** 5 de enero del 2026

**7. Software antiplagio:**

TURNITIN

URKUND (OURIGINAL) (\*)

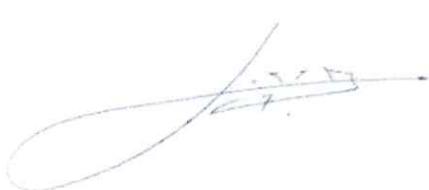
**8. Porcentaje de Informe de Similitud:** 19 %

**9. Código Documento:** 3117:544235874

**10. Resultado de la Evaluación de Similitud:**

APROBADO  PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 08 de enero del 2026.



**FIRMA DEL ASESOR**

Nombres y Apellidos José Benjamín Torres Tafur

DNI: 26678955



Firmado digitalmente por:  
BAZAN DIAZ Laura Sofia  
FAU 20148258601 soft  
Motivo: En señal de  
conformidad  
Fecha: 08/01/2026 10:25:55-0500

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI**



### ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

**TITULO** : INTEGRACIÓN Y APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SOFT COMPUTING (FAHP Y FWA) PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO EN 5 TRAMOS DE LA CARRETERA CA-1071 EN EL CENTRO POBLADO DE TARTAR CHICO, DISTRITO DE LOS BAÑOS DEL INCA, DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA.

**ASESOR** : M. en I. Ing. José Benjamín Torres Tafur.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0032-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 09 de enero de 2026, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **catorce días del mes de enero de 2026**, siendo las diecisésis horas (4:00 p.m.) en la Sala de Audiovisuales (Edificio 1A – Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : M.Cs. Ing. Sergio Manuel Huamán Sangay.  
Vocal : M. en T. Ing. Alejandro Cubas Becerra.  
Secretario : Ing. William Próspero Quiroz Gonzales.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **INTEGRACIÓN Y APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SOFT COMPUTING (FAHP Y FWA) PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO EN 5 TRAMOS DE LA CARRETERA CA-1071 EN EL CENTRO POBLADO DE TARTAR CHICO, DISTRITO DE LOS BAÑOS DEL INCA, DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA**, presentado por **MIRELLA LISBETH SÁNCHEZ CHUCCHUCÁN**, asesorada por el M. en I. Ing. José Benjamín Torres Tafur, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron a la sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y la evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : ..... **07** .... PTS.  
EVALUACIÓN PÚBLICA : ..... **11** .... PTS.  
EVALUACIÓN FINAL : ..... **18** .... PTS ..... **DIECIOCHO** ..... (En letras)

En consecuencia, se la declara **APROBADA** con el calificativo de **DIECIOCHO (18)**.  
acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las ..... **17...30** ..... horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

M.Cs. Ing. Sergio Manuel Huamán Sangay.  
Presidente

M. en T. Ing. Alejandro Cubas Becerra.  
Vocal

Ing. William Próspero Quiroz Gonzales.  
Secretario

M. en I. Ing. José Benjamín Torres Tafur.  
Asesor

COPYRIGHT © 2025  
By Sánchez Chucchucán Mirella Lisbeth  
Todos los derechos reservados

## **DEDICATORIA**

*A mi querida madre, por su apoyo incondicional  
y amor infinito.*

*A mi padre, por su amor y confianza en que puedo  
alcanzar todos mis sueños.*

*A mi hermano, por iluminar mis días con su  
alegría y corazón bondadoso.*

*A mi compañero incondicional, por ser mi  
fortaleza en los momentos difíciles y mi motivación  
para seguir creciendo.*

*A la memoria de mi querido abuelo José  
Chucchucán por siempre creer en mí.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios por darme la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa.*

*A mi familia por su cariño, consejos y motivación constante.*

*A mis amigos y compañeros de carrera, quienes compartieron conmigo las alegrías y tristezas a lo largo de este camino.*

*A mi universidad, docentes y en especial a mi asesor de tesis, el Ing. José Benjamín Torres Tafur por su guía y apoyo en el desarrollo de esta investigación.*

*Extiendo un agradecimiento especial a los ingenieros e ingeniera que conformaron el grupo de expertos consultados en el marco de esta investigación, quienes con generosidad me brindaron su tiempo, experiencia y conocimiento.*

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Planteamiento Del Problema.....	1
1.2. Formulación del problema .....	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos .....	2
1.3. Hipótesis.....	2
1.4. Variables .....	2
1.5. Justificación de la investigación.....	2
1.6. Alcances o delimitación de la investigación .....	4
1.7. Limitación de la investigación. ....	4
1.8. Objetivos .....	4
1.8.1. Objetivo General .....	4
1.8.2. Objetivos Específicos.....	4
1.9. Operacionalización de variables.....	6
1.10. Matriz de consistencia.....	7
1.11. Descripción del contenido de los capítulos. ....	8
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	9
2.1. Antecedentes Teóricos.....	9
2.1.1. Antecedentes teóricos Internacionales .....	9
2.1.2. Antecedentes teóricos Nacionales.....	10
2.1.3. Antecedentes teóricos Locales .....	11
2.2. Bases teóricas .....	12
2.2.1. Soft computing .....	12
2.2.2. Lógica Difusa .....	13
2.2.3. Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (FAHP) .....	13
2.2.4. Fundamentos matemáticos del FAHP .....	14
2.2.5. Método del Promedio Ponderado Difuso (Fuzzy Weighted Average) .....	21
2.2.6. Base matemática del FWA .....	22

2.2.7.	Método PCI .....	22
2.2.8.	Procedimiento de cálculo PCI.....	23
2.2.9.	Fallas consideradas para el PCI.....	26
2.2.10.	Ábacos PCI – Pavimentos asfálticos .....	45
2.2.11.	Software EvalPavCar .....	55
2.2.12.	Índice Internacional de Rugosidad (IRI) .....	55
2.2.13.	Roadroid.....	57
2.2.14.	Resistencia al Deslizamiento.....	60
2.2.15.	Ensayo Círculo de arena.....	61
2.2.16.	Inspección visual para cálculo de fricción .....	63
2.2.17.	Evaluación del estado de la superficie del pavimento.....	63
2.2.18.	Pavimento flexible.....	64
2.2.19.	Clasificación de fallas en pavimentos flexibles .....	65
2.2.20.	Mantenimiento vial .....	66
2.2.21.	Gestión del mantenimiento vial.....	67
2.2.22.	Evaluación Superficial de pavimentos: .....	68
2.2.23.	Levantamiento topográfico .....	68
2.3.	Definición de términos básicos .....	69
3.	CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .....	70
3.1.	Periodo .....	70
3.2.	Ubicación .....	70
3.2.1.	Ubicación política .....	70
3.2.2.	Ubicación Geográfica.....	71
3.3.	Metodología de la Investigación .....	71
3.3.1.	Tipo, nivel y diseño de aplicación.....	71
3.3.2.	Población.....	72
3.3.3.	Muestra.....	72
3.3.4.	Unidad de Análisis. ....	72
3.3.5.	Unidad de observación.....	72
3.3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	73
3.4.	Procedimiento.....	73
3.4.1.	Definición y Delimitación de Tramos de Estudio .....	73
3.4.2.	Levantamiento Topográfico. ....	74

3.4.3. Procesamiento de la Evaluación Funcional.....	76
3.5. Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados. ....	90
3.5.1. Tratamiento y análisis de datos. ....	90
3.5.1.1. Fase de ponderación de criterios: FAHP .....	90
3.5.1.2. Fusificación de Variables de Entrada .....	98
3.5.1.3. Agregación y Desfusificación: FWA.....	101
3.5.1.4. Definición de la Escala del Índice de Evaluación Compuesta (IEC) .....	102
3.5.2. Resultados .....	105
4. CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	106
4.1. Análisis y discusión de resultados según objetivos planteados.....	106
4.1.1. Objetivo específico 1: Identificar los tramos en estudio .....	106
4.1.2. Objetivo específico 2: Realizar levantamiento topográfico y planos.....	106
4.1.3. Objetivo Específico 3, 4 y 5: Evaluación Funcional del pavimento .....	108
4.1.4. Objetivo específico 6: Aplicación de FAHP para determinar pesos de criterios....	116
4.1.5. Objetivo específico 7: Aplicar FWA para obtener IEC .....	117
4.1.6. Objetivo Específico 8: Comparación entre criterios .....	119
4.1.7. Objetivo general: Estado del pavimento de los 5 tramos .....	121
5. CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	124
5.1. CONCLUSIONES .....	124
5.2. RECOMENDACIONES .....	127
ANEXOS.....	132
ANEXO A: MATRICES DE COMPARACIÓN DE EXPERTOS-FAHP .....	133
ANEXO B: CONSISTENCIA DE MATRICES DE COMPARACIÓN PAREADA .....	135
ANEXO C: VECTORES DE PESOS NORMALIZADOS .....	140
ANEXO D: INVENTARIO DE FALLAS PCI .....	145
ANEXO E: REPORTES DE EVALPAVCAR DE VALORES PCI .....	150
ANEXO F: REPORTE DE ROADROID DE VALORES <i>CIRI Y EIRI</i> .....	155
ANEXO G: PANEL FOTOGRÁFICO.....	162
ANEXO H: PLANOS .....	169

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Operacionalización de variables .....</i>	6
<i>Tabla 2 Matriz de consistencia.....</i>	7
<i>Tabla 3 Escala lingüística difusa .....</i>	17
<i>Tabla 4 Valores de ICA .....</i>	18
<i>Tabla 5 Rangos de Calificación del PCI.....</i>	23
<i>Tabla 6 Piel de cocodrilo (grietas por fatiga).....</i>	26
<i>Tabla 7 Exudación.....</i>	27
<i>Tabla 8 Agrietamiento en bloque .....</i>	28
<i>Tabla 9 Abultamientos y hundimientos (bumps and sags) .....</i>	29
<i>Tabla 10 Corrugación (lavadero).....</i>	30
<i>Tabla 11 Depresión.....</i>	31
<i>Tabla 12 Grieta de borde.....</i>	32
<i>Tabla 13 Grieta de reflexión de junta (en sobreapas asfálticas sobre PCC) .....</i>	33
<i>Tabla 14 Desnivel carril/berma .....</i>	34
<i>Tabla 15 Grietas longitudinales y transversales (no relacionadas con juntas de concreto) ...</i>	35
<i>Tabla 16 Parcheo y acometidas de servicios (reparaciones) .....</i>	36
<i>Tabla 17 Pulimento de agregados.....</i>	37
<i>Tabla 18 Huecos (baches) .....</i>	38
<i>Tabla 19 Cruce de vía férrea .....</i>	39
<i>Tabla 20 Ahuellamiento (rutting) .....</i>	40
<i>Tabla 21 Desplazamiento (shoving) .....</i>	41
<i>Tabla 22 Grietas parabólicas (slippage cracking).....</i>	42
<i>Tabla 23 Hinchamiento (swelling) .....</i>	43
<i>Tabla 24 Meteorización / desprendimiento de agregados (weathering &amp; raveling).....</i>	44
<i>Tabla 25 Estado Vial según Rugosidad.....</i>	56
<i>Tabla 26 Coordenadas de la carretera en estudio .....</i>	71
<i>Tabla 27 Resumen de VD de UM 1 – Tramo 1 .....</i>	81
<i>Tabla 28 Determinación de VD Corregido – UM 1 – TRAMO 1.....</i>	81
<i>Tabla 29 Grupo de expertos involucrados en la toma de decisiones .....</i>	92
<i>Tabla 30 Escala lingüística difusa propuesta por Kabir &amp; Akhtar Hasin (2011).....</i>	93
<i>Tabla 31 Escala de clasificación del IRI.....</i>	99
<i>Tabla 32 Escala de clasificación del PCI .....</i>	99
<i>Tabla 33 Escala de clasificación de la Profundidad de Textura .....</i>	99
<i>Tabla 34 Escala lingüística y fusificada de los criterios.....</i>	100
<i>Tabla 35 Escala de Clasificación del Índice de Evaluación Compuesta (IEC) .....</i>	104
<i>Tabla 36 Ubicación de tramos .....</i>	106
<i>Tabla 37 Datos de entrada .....</i>	109
<i>Tabla 38 Resumen de resultados de PCI.....</i>	110
<i>Tabla 39 Resumen de resultados de Valores IRI .....</i>	112
<i>Tabla 40 Resumen de resultados de MTD por Tramo .....</i>	114
<i>Tabla 41 Pesos ponderados de criterios evaluadores.....</i>	117
<i>Tabla 42 Valores de salida: Fusificados.....</i>	118

<i>Tabla 43 Valores Ÿfinales de Tramos .....</i>	118
<i>Tabla 44 Valores Y desfusificados de los Tramos.....</i>	119
<i>Tabla 45 Resultados de IRI, PCI, MTD y IEC .....</i>	119
<i>Tabla 46 Clasificación del estado de pavimento de los tramos en estudio.....</i>	121
<i>Tabla 47 Matriz de comparación pareada: Experto 1 .....</i>	133
<i>Tabla 48 Matriz de comparación pareada: Experto 2 .....</i>	133
<i>Tabla 49 Matriz de comparación pareada: Experto 3 .....</i>	133
<i>Tabla 50 Matriz de comparación pareada: Experto 4 .....</i>	134
<i>Tabla 51 Matriz de comparación pareada: Experto 5 .....</i>	134
<i>Tabla 52 Inventario de Fallas – Tramo 1 .....</i>	145
<i>Tabla 53 Inventario de Fallas – Tramo 2 .....</i>	146
<i>Tabla 54 Inventario de Fallas – Tramo 3 .....</i>	147
<i>Tabla 55 Inventario de Fallas – Tramo 4.....</i>	148
<i>Tabla 56 Inventario de Fallas – Tramo 5.....</i>	149
<i>Tabla 57 Reporte de EvalPavCar – Tramo 1 .....</i>	150
<i>Tabla 58 Reporte de EvalPavCar – Tramo 2 .....</i>	151
<i>Tabla 59 Reporte de EvalPavCar – Tramo 3 .....</i>	152
<i>Tabla 60 Reporte de EvalPavCar – Tramo 4 .....</i>	153
<i>Tabla 61 Reporte de EvalPavCar – Tramo 5 .....</i>	154
<i>Tabla 62 Valores cIRI y eIRI de Tramo 1, carril Derecho.....</i>	155
<i>Tabla 63 Valores cIRI y eIRI de Tramo 1, carril Izquierdo.....</i>	158

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Función de membresía triangular.....</i>	15
<i>Figura 2 Distribución de la Función Trapezoidal .....</i>	16
<i>Figura 3 Agregación de prioridades individuales .....</i>	19
<i>Figura 4 Severidad de falla Piel de Cocodrilo .....</i>	26
<i>Figura 5 Severidad de falla Exudación.....</i>	27
<i>Figura 6 Severidad de falla Agrietamiento en Bloque.....</i>	28
<i>Figura 7 Severidad de falla Abultamientos y hundimientos .....</i>	29
<i>Figura 8 Severidad de falla Corrugación .....</i>	30
<i>Figura 9 Severidad de falla Depresión .....</i>	31
<i>Figura 10 Severidad de falla Rotura de Borde .....</i>	32
<i>Figura 11 Severidad de falla Grieta de reflexión de junta.....</i>	33
<i>Figura 12 Severidad de falla Desnivel.....</i>	34
<i>Figura 13 Severidad de falla Grietas Longitudinales y Transversales.....</i>	35
<i>Figura 14 Parcheo y acometidas de servicios .....</i>	36
<i>Figura 15 Pulimento de agregados.....</i>	37
<i>Figura 16 Huecos.....</i>	38
<i>Figura 17 Cruce de vía férrea.....</i>	39
<i>Figura 18 Ahuellamiento.....</i>	40
<i>Figura 19 Desplazamiento .....</i>	41
<i>Figura 20 Grietas parabólicas.....</i>	42
<i>Figura 21 Hinchamiento .....</i>	43
<i>Figura 22 Desprendimiento de Agregados .....</i>	44
<i>Figura 23 Curva de valor deducido – Piel de cocodrilo .....</i>	45
<i>Figura 24 Curva de valor deducido - Exudación .....</i>	45
<i>Figura 25 Curva de valor deducido – Agrietamiento en bloque .....</i>	46
<i>Figura 26 Curva de valor deducido - Abultamientos y hundimientos .....</i>	46
<i>Figura 27 Curva de valor deducido – Corrugación .....</i>	47
<i>Figura 28 Curva de valor deducido – Depresión .....</i>	47
<i>Figura 29 Curva de valor deducido – Grieta de borde .....</i>	48
<i>Figura 30 Curva de valor deducido – Grietas de reflexión de juntas.....</i>	48
<i>Figura 31 Curva de valor deducido – Desnivel carril / berma .....</i>	49
<i>Figura 32 Curva de valor deducido – Grietas Longitudinales y Transversales .....</i>	49
<i>Figura 33 Curva de valor deducido – Parcheo y acometidas de servicios.....</i>	50
<i>Figura 34 Curva de valor deducido – Pulimento de agregados.....</i>	50
<i>Figura 35 Curva de valor deducido – Huecos.....</i>	51
<i>Figura 36 Curva de valor deducido – Cruce de vía férrea.....</i>	51
<i>Figura 37 Curva de valor deducido – Ahuellamiento.....</i>	52
<i>Figura 38 Curva de valor deducido – Desplazamiento .....</i>	52
<i>Figura 39 Curva de valor deducido – Grieta parabólica o por deslizamiento .....</i>	53
<i>Figura 40 Curva de valor deducido – Hinchamiento .....</i>	53
<i>Figura 41 Curva de valor deducido – Desprendimiento de agregado grueso.....</i>	54
<i>Figura 42 Curva de valor deducido corregido (VDC).....</i>	54

<i>Figura 43 Interfaz de Software EvalPavCar.....</i>	55
<i>Figura 44 Escala de Rugosidad IRI (m/km).....</i>	57
<i>Figura 45 Procedimiento de Ensayo de Círculo de Arena.....</i>	61
<i>Figura 46 La textura del pavimento en relación con la resistencia al deslizamiento.....</i>	63
<i>Figura 47 Estructura de pavimento Flexible .....</i>	64
<i>Figura 48 Distribuciones de carga de pavimentos .....</i>	65
<i>Figura 49 Proceso de Gestión y Administración de la conservación vial .....</i>	67
<i>Figura 50 Macro localización.....</i>	70
<i>Figura 51 Micro localización.....</i>	71
<i>Figura 52 Diagrama de flujo para la priorización de los tramos. ....</i>	73
<i>Figura 53 Interfaz de EvalPav, creación de Proyecto .....</i>	78
<i>Figura 54 Interfaz de EvalPav, Evaluación de Pavimento .....</i>	78
<i>Figura 55 Interfaz de EvalPav para la evaluación de UM 1 de Tramo 1.....</i>	79
<i>Figura 56 Determinación de Valor deducido-UM2, Tramo 1 - Huecos .....</i>	80
<i>Figura 57 Obtención de VD corregidos en curva de corrección.....</i>	82
<i>Figura 58 Reporte de resultados de evaluación de Tramo 1 .....</i>	83
<i>Figura 59 Instalación de equipo móvil en soporte de celular .....</i>	83
<i>Figura 60 Configuraciones iniciales en la aplicación Rroadroid.....</i>	84
<i>Figura 61 Calibración de equipo.....</i>	84
<i>Figura 62 Inicio de recorrido con Rroadroid en Progresiva 0+00 km .....</i>	85
<i>Figura 63 Toma de datos con Rroadroid en carril izquierdo .....</i>	85
<i>Figura 64 Equipo utilizado para ensayo círculo de arena .....</i>	87
<i>Figura 65 Limpieza de área de muestra .....</i>	88
<i>Figura 66 Vaciado de arena sobre superficie de pavimento .....</i>	88
<i>Figura 67 Formación de círculo de arena .....</i>	89
<i>Figura 68 Medición del diámetro de círculo de arena.....</i>	89
<i>Figura 69 Árbol de Jerarquización.....</i>	91
<i>Figura 70 Función de Membresía Triangular de comparaciones pareadas.....</i>	93
<i>Figura 71 Matriz de comparación de pareada .....</i>	94
<i>Figura 72 Función de membresía para la clasificación de criterios de evaluación.....</i>	100
<i>Figura 73 Funciones de pertenencia de salida para la clasificación del IEC .....</i>	105
<i>Figura 74 Vista de plano de Ubicación.....</i>	107
<i>Figura 75 Grafico de comparación de resultados de PCI entre tramos.....</i>	111
<i>Figura 76 Grafico de valores IRI del carril derecho. ....</i>	113
<i>Figura 77 Grafico de valores IRI del carril izquierdo. ....</i>	113
<i>Figura 78 Gráfico de comparación de resultados de IRI entre tramos .....</i>	114
<i>Figura 79 Grafico de valores MTD por Tramos. ....</i>	116
<i>Figura 80 Perfil multicriterio por tramo .....</i>	120

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Función de pertenencia triangular .....</i>	15
<i>Ecuación 2: Función de pertenencia Trapezoidal .....</i>	15
<i>Ecuación 3: Reciprocidad difusa .....</i>	17
<i>Ecuación 4: Valor propio Máximo .....</i>	17
<i>Ecuación 5: Índice de Consistencia .....</i>	18
<i>Ecuación 6: Razón de Consistencia .....</i>	18
<i>Ecuación 7: Valor Sintético Difuso .....</i>	19
<i>Ecuación 8: Grado de posibilidad .....</i>	20
<i>Ecuación 9: Normalización de Vector de Pesos.....</i>	20
<i>Ecuación 10: Vector de evaluación Global.....</i>	20
<i>Ecuación 11: Fórmula del Centroide para Números Triangulares.....</i>	21
<i>Ecuación 12: Fórmula general Promedio Ponderado Difuso .....</i>	22
<i>Ecuación 13: Método de suma de rangos .....</i>	22
<i>Ecuación 14: Número de unidades de Muestreo.....</i>	24
<i>Ecuación 15: Intervalo de Muestreo .....</i>	24
<i>Ecuación 16: Número máximo admisible de valores deducidos.....</i>	25
<i>Ecuación 17: Ecuación del IRI .....</i>	59
<i>Ecuación 18: Corrección del IRI con Factos de Sensibilidad .....</i>	59
<i>Ecuación 19: Volumen interno de cilindro.....</i>	62
<i>Ecuación 20: Profundidad de macrotextura .....</i>	62

## RESUMEN

La presente investigación fue desarrollada en el centro poblado TarTar chico, en un sector de la carretera CA-1071, que producto del uso continuo y poco mantenimiento presenta múltiples fallas visibles provocando inseguridad e incomodidad en los usuarios de la zona periurbana, por lo que la investigación tuvo como objetivo evaluar el estado del pavimento de cinco tramos de la carretera CA-1071, ubicada en el Centro Poblado de Tartar Chico, Cajamarca, mediante la integración y aplicación de los métodos FAHP y FWA. El estudio integró métodos de Soft Computing basados en lógica difusa: el Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP) para la ponderación de criterios y el Promedio Ponderado Difuso (FWA) para la agregación de datos. Se evaluaron tres indicadores de desempeño en una longitud de 2.13 km: la condición superficial mediante el método PCI, la regularidad (rugosidad) a través del IRI utilizando la aplicación Roadroid, y la seguridad operacional (adherencia) mediante la profundidad de textura (MTD). Los resultados del modelamiento FAHP, basados en el juicio de expertos, determinaron que el deterioro del pavimento (PCI) es el criterio más influyente con un peso de 43.03%, seguido por la seguridad (39.82%) y la comodidad (17.16%). Tras la aplicación del algoritmo FWA, se obtuvo un Índice de Evaluación Compuesta (IEC) que identificó al Tramo 3 como el sector en peor estado, con un IEC de 0.51 (clasificación "Regular"), al Tramo 2, 4 y 5 con IEC de 0.25 (clasificación "Bueno") y al Tramo 1 con un IEC de 0.11 (clasificación "Muy Bueno").

**Palabras clave:** Pavimentos flexibles, Soft Computing, FAHP, FWA, Gestión de Mantenimiento vial, PCI, IRI, Profundidad Media de Textura.

## ABSTRACT

This research was conducted in the town of TarTar Chico, in a section of the CA-1071 highway, which, as a result of continuous use and poor maintenance, has multiple visible defects causing insecurity and discomfort for users in the peri-urban area. The objective of the research was to evaluate the condition of the pavement on five sections of the CA-1071 highway, located in the town of Tartar Chico, Cajamarca, through the integration and application of the FAHP and FWA methods. The study integrated Soft Computing methods based on fuzzy logic: the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) for weighting criteria and the Fuzzy Weighted Average (FWA) for data aggregation. Three performance indicators were evaluated over a length of 2.13 km: surface condition using the PCI method, regularity (roughness) using the IRI with the Roadroid application, and operational safety (adhesion) using texture depth (MTD). The results of the FAHP modeling, based on expert judgment, determined that pavement deterioration (PCI) is the most influential criterion with a weight of 43.03%, followed by safety (39.82%) and comfort (17.16%). After applying the FWA algorithm, a Composite Evaluation Index (CEI) was obtained that identified Section 3 as the worst section, with a CEI of 0.51 (rating “Fair”), Sections 2, 4, and 5 with a CEI of 0.25 (rating ‘Good’), and Section 1 with a CEI of 0.11 (rating “Very Good”).

**Keywords:** Flexible pavements, Soft Computing, FAHP, FWA, Road Maintenance Management, PCI, IRI, Average Texture Depth.

## **1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Planteamiento Del Problema**

Con el tiempo, el pavimento de una carretera se deteriora, por lo que se requiere un sistema de gestión de pavimentos que permita clasificar su estado y priorizar intervenciones de mantenimiento. Tradicionalmente, se utilizan indicadores como el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), que mide la regularidad superficial del pavimento; el Índice de Condición del Pavimento (PCI), que cuantifica su nivel de deterioro; y la Profundidad Media de Textura (MTD), que refleja la seguridad de frenado sobre la capa de rodadura. Cada indicador aporta información complementaria por lo que solo uno de estos indicadores no es necesariamente suficiente para describir el estado de la carretera de manera integral. En consecuencia, la evaluación convencional resulta a menudo fragmentada y subjetiva al depender de análisis aislados.

Según CONREVIAL (2000) cuando se trata de evaluar grandes extensiones de una red vial, la metodología más completa y racional es la que combina diversos parámetros, al permitir tomar un criterio ingenieril y ponderar la importancia de las distintas variables. De ahí que para evaluar el estado real del pavimento en los cinco tramos de la CA-1071 sea necesario combinar múltiples criterios.

Un enfoque apropiado es el uso de métodos de Soft Computing (computación blanda) que integren los criterios difusos. En particular, el Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP) y el Promedio Ponderado Difuso (FWA). Estas técnicas integran matemáticamente variables clave (IRI, PCI, MTD) mediante lógica difusa, permitiendo obtener un único diagnóstico, preciso y coherente para que sirva de apoyo a la gestión de mantenimiento vial.

## **1.2. Formulación del problema**

### ***1.2.1. Problema general.***

¿Cuál es el estado del pavimento de los 5 tramos de la carretera CA-1071, resultante de la integración y aplicación de los métodos de Soft Computing (FAHP y FWA)?

### ***1.2.2. Problemas específicos***

1. ¿Cuáles son los tramos de la carretera CA-1071 en estudio?
2. ¿Qué características geométricas y físicas presentan los tramos en estudio?
3. ¿Cuál es el estado del pavimento de los 5 tramos según el PCI?
4. ¿Cuál es el estado de rugosidad de los 5 tramos según el IRI?
5. ¿Cuál es el estado de textura pavimento de los 5 tramos según la MTD?
6. ¿Cómo puede aplicarse el método FAHP?
7. ¿Cómo puede aplicarse el método FWA?
8. ¿Qué diferencias y/o similitudes presenta los resultados del PCI, IRI, MTD y la evaluación con los métodos de Soft Computing (IEC)?

## **1.3. Hipótesis**

La integración y aplicación los métodos FAHP y FWA, determina mediante un índice que el estado de los 5 tramos de la carretera CA-1071 es “regular”.

## **1.4. Variables**

- FAHP
- FWA
- Estado de conservación del pavimento (clasificación)

## **1.5. Justificación de la investigación**

Esta investigación es relevante porque avanza el conocimiento en análisis de pavimentos al incorporar métodos de Soft Computing (FAHP y FWA) en la evaluación del

estado vial. Estas técnicas difusas permiten manejar la imprecisión de los datos y sintetizar múltiples parámetros de desempeño en un esquema de decisión multicriterio.

Esta tesis contribuye metodológicamente al campo de la gestión de pavimentos, al integrar modelos difusos que conectan juicios de expertos con datos de campo para generar un índice de evaluación compuesto fundamentado y cuantificable. Esto supone una mejora sobre las prácticas convencionales de diagnóstico, ya que sustituye juicios aislados y subjetivos por un procedimiento sistemático basado en lógica difusa y análisis multicriterio.

El uso de estos métodos tradicionales de forma aislada presenta limitaciones significativas para una gestión integral, como se detalla a continuación:

- El método PCI: El PCI no mide la respuesta dinámica del vehículo. Un pavimento puede tener un PCI aceptable, pero presentar una rugosidad alta que lo haga incómodo o inseguro a altas velocidades, o tener problemas de adherencia invisibles a la inspección visual simple.
- El método IRI: Evalúa únicamente la regularidad superficial, omitiendo la condición estructural o la seguridad por adherencia.
- Profundidad Media de Textura (MTD): Este indicador es unidimensional hacia la seguridad operativa. Un pavimento puede tener una excelente textura (alto MTD) y evitar el hidroplaneo, pero estar estructuralmente colapsado (piel de cocodrilo) o ser extremadamente irregular.

Esta fragmentación impide obtener un diagnóstico único y preciso, generando incertidumbre en la priorización del mantenimiento.

En tal sentido, el proyecto genera un modelo práctico que apoya la gestión vial local: los ingenieros y responsables de mantenimiento cuentan con una guía cuantitativa para evaluar el estado real del pavimento y priorizar reparaciones según la criticidad de cada tramo, optimizando costos y tiempos de ejecución.

Por último, esta investigación beneficia directamente al bienestar de la población de Tartar Chico y alrededores, ya que promueve la seguridad vial: estadísticas oficiales indican que aproximadamente el 66 % de los accidentes viales con desenlace fatal ocurre en zonas rurales (Félix Paz Quiroz, 2025) por lo que mejorar la infraestructura pavimentada contribuye a disminuir siniestros.

## **1.6. Alcances o delimitación de la investigación**

El estudio se realizó en la carretera CA-1071, específicamente en el centro poblado de Tartar Chico, Distrito de los Baños del Inca, Departamento de Cajamarca que comprende una extensión de 2.13 km de longitud de pavimento. La investigación abarcó un periodo de 3 meses, comenzando en junio de 2025 y finalizando en setiembre de 2025. La investigación se limita a la evaluación superficial y funcional del pavimento flexible.

## **1.7. Limitación de la investigación.**

No existen limitaciones para el desarrollo de esta investigación.

## **1.8. Objetivos**

### ***1.8.1. Objetivo General***

Evaluar el estado del pavimento de los cinco tramos de la carretera CA-1071, mediante la integración y aplicación de los métodos FAHP y FWA.

### ***1.8.2. Objetivos Específicos***

- Identificar los tramos de la carretera CA-1071
- Realizar el levantamiento topográfico de los tramos en estudio y sus respectivos planos.
- Calcular el valor de PCI de los 5 tramos en estudio
- Calcular el valor de IRI de los 5 tramos en estudio
- Calcular el valor de MTD de los 5 Tramos en estudio
- Aplicar el FAHP difuso para determinar los pesos relativos de los criterios IRI, PCI y MTD a partir del juicio de expertos en pavimentos y definir funciones de pertenencia.

- Emplear el método FWA para integrar los valores medidos de IRI, PCI y MTD, obteniendo así el Índice de Evaluación Compuesto (IEC)
- Comparar los resultados de IRI, PCI, MTD e IEC.

## 1.9. Operacionalización de variables

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

HIPÓTESIS	DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE VARIABLES	VARIABLES	DIMENSIONES	OPERACIONALIZACIÓN	
				INDICADORES	FUENTE
<b>VARIABLE 1, 2</b>					
La integración y aplicación los métodos FAHP y FWA, determina mediante un índice que el estado de los 5 tramos de la carretera CA-1071 es “regular”.	Método que permite jerarquizar criterios y subcriterios de decisión mediante comparaciones pareadas y valores difusos Saaty (1990)	Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP).	Jerarquización de Criterios.	Vector de Pesos Difusos ( $W_i$ ), y Relación de Consistencia (CR)	Formato de Matriz de Comparación por Pares utilizando la escala de Saaty adaptada a lógica difusa
	Método que utiliza números difusos y ponderaciones lingüísticas para evaluar alternativas o indicadores Dong & Wong (1987).	Promedio Ponderado Difuso (FWA)	Definición de Funciones de Pertenencia Evaluación Funcional (Comodidad) Evaluación Superficial (Deterioro) Evaluación de Seguridad (Adherencia)	Límites de los TFN ( $l$ , $m$ , $u$ ) Índice Internacional de Rugosidad (IRI): Medido en m/km Índice de Condición del Pavimento (PCI): Valor numérico de 0 a 100. Profundidad Media de Textura (MTD): Medido en milímetros (mm)	Aplicativo Móvil Roadroid Pro, Fichas de Inspección Visual (Formato ASTM D6433) y Equipo de Ensayo de Círculo de Arena (ASTM E965)
<b>VARIABLE 3</b>					
	En el contexto de un modelo multicriterio FAHP–FWA, es la categoría global que resume la condición integral del pavimento tras combinar varios indicadores técnicos	Estado de conservación del pavimento	Estado general del pavimento	Valor del Índice de Evaluación Compuesta (IEC) y Categoría de condición	Matriz de Procesamiento de Datos

## 1.10. Matriz de consistencia

**Tabla 2**

*Matriz de consistencia*

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	FUENTE	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables					
¿Cuál es el estado del pavimento de los 5 tramos de la carretera CA-1071, resultante de la integración y aplicación de los métodos de Soft Computing (FAHP y FWA)?	Evaluar el estado del pavimento de los cinco tramos de la carretera CA-1071, mediante la integración y aplicación de los métodos FAHP y FWA.		Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP).	Jerarquización de Criterios. Definición de Funciones de Pertenencia	Vector de Pesos Difusos ( $W_i$ ), y Relación de Consistencia (CR)	Límites de los TFN ( $l, m, u$ )	Formato de Matriz de Comparación por Pares	CARRETERA CA-1071, CP TARTAR CHICO
Problemas Específicos	Objetivos Específicos							
¿Cuáles son los tramos y tipos de fallas presentes a lo largo de la carretera CA-1071 que afectan su desempeño funcional?	Identificar tramos y fallas encontradas de la carretera CA-1071.			Evaluación Funcional (Comodidad)	IRI: Medido en m/km			
¿Qué características geométricas y físicas presentan los tramos en estudio?	Realizar el levantamiento topográfico de los tramos en estudio y sus respectivos planos	La integración y aplicación los métodos FAHP y FWA, determina mediante un índice que el estado de los 5 tramos de la carretera CA-1071 es “regular”.	Promedio Ponderado Difuso (FWA)	Evaluación Superficial (Deterioro)	PCI: Valor numérico de 0 a 100.		Aplicativo Randroid Pro, Fichas de Inspección Visual (Formato ASTM D6433) y Equipo de Ensayo de Círculo de Arena (ASTM E965)	* Tipo de Investigación: Aplicada * Nivel: Descriptiva. * Diseño de investigación: No experimental
¿Cuál es el estado del pavimento de los 5 tramos según el PCI?	Calcular el valor de PCI de los 5 tramos en estudio			Evaluación de Seguridad (Adherencia)	MTD: Medido en milímetros (mm)			
¿Cuál es el estado de rugosidad de los 5 tramos según el IRI?	Calcular el valor de IRI de los 5 tramos en estudio							
¿Cuál es el estado de textura pavimento de los 5 tramos según la MTD?	Calcular el valor de MTD de los 5 Tramos en estudio							
¿Cómo puede aplicarse el método FAHP?	Aplicar el FAHP para determinar los pesos relativos de los criterios y definir funciones de pertenencia.							
¿Cómo puede aplicarse el método FWA?	Emplear el método FWA para agregar los valores medidos de IRI, PCI y MTD							
¿Qué diferencias y/o similitudes presenta los resultados del PCI, IRI, MTD y la evaluación con los métodos de Soft Computing?	Comparar los resultados de IRI, PCI, MTD e IEC		Estado de conservación del pavimento	Estado general del pavimento	Valor del Índice de Evaluación Compuesta (IEC) y Categoría de condición		Matriz de Procesamiento de Datos	5 tramos de la Carretera CA-1071, C.P. Tartar Chico

**1.11. Descripción del contenido de los capítulos.**

**CAPÍTULO I: Introducción**

- Se establece las bases de la investigación, se presenta el planteamiento y formulación del problema, incluye la hipótesis, las variables de estudio, la justificación, los alcances y limitaciones, así como los objetivos generales y específicos. También contiene la operacionalización de variables y la matriz de consistencia.

**CAPÍTULO II: Marco Teórico**

- Recopila los antecedentes internacionales, nacionales y locales relacionados con la evaluación de pavimentos y lógica difusa. Desarrolla las bases teóricas que sustentan la investigación, explicando detalladamente los conceptos de la investigación.

**CAPÍTULO III: Materiales y Métodos**

- Describe el diseño metodológico de la investigación y el entorno del estudio. Detalla la población y muestra y los instrumentos de recolección de datos. Explica el procedimiento, tratamiento, y análisis de datos.

**CAPÍTULO IV: Análisis y Discusión de Resultados**

- Presenta los hallazgos de la investigación, también un análisis y discusión de los resultados. Finaliza con la contrastación de la hipótesis.

**CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones**

- Sintetiza las conclusiones principales que responden a los objetivos planteados. Ofrece recomendaciones técnicas y de gestión para el mantenimiento de la vía y futuras investigaciones

## 2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes Teóricos

#### 2.1.1. *Antecedentes teóricos Internacionales*

Lemonakis et al. (2023) En su artículo “*Introduction of a new index to assess pavement functional condition*”: En un contexto donde la expansión de las redes viales ha alcanzado su madurez en muchos países, la atención se ha desplazado hacia la gestión eficiente del mantenimiento de los pavimentos existentes. En este marco, Lemonakis, Kopolias y Karlaftis (2023) desarrollaron un índice innovador para evaluar la condición funcional de los pavimentos, integrando tanto las demandas esenciales del pavimento como las características superficiales. El modelo propuesto se fundamenta en la técnica del Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (FAHP), permitiendo incorporar la incertidumbre y subjetividad inherentes a las evaluaciones de expertos. A través de esta metodología, se asignan pesos de importancia a criterios y subcriterios relacionados con la función del pavimento, los cuales se combinan con variables derivadas de mediciones periódicas de las características del pavimento para evaluar su estado funcional. La validez del modelo se verifica mediante comparaciones con el AHP tradicional, destacando la influencia de la incertidumbre en las evaluaciones de expertos. Además, se confirma la aplicabilidad y facilidad de ajuste del método FAHP en problemas de gestión de pavimentos, utilizando datos de la Red Nacional de Carreteras.

Smrudu et al. (2023) en el artículo de investigación: “*Pavement condition assessment using fuzzy analytic hierarchy processes. International Journal of Pavement Research and Technology*” En el ámbito de la gestión de pavimentos, la evaluación precisa de su estado es fundamental para la planificación efectiva de mantenimiento y rehabilitación. En este contexto, Smrudu, Kumar y Akkara (2023) desarrollaron un modelo de evaluación de la condición del pavimento utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (FAHP). Este enfoque integra indicadores clave como el Índice de Condición del Pavimento (PCI), la deflexión característica, el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) y el volumen de vehículos comerciales por día (CVPD). Mediante el desarrollo de un software en

Python, se calculó el Índice de Prioridad de Pavimento Difuso (FPPI), permitiendo priorizar tramos de carreteras en función de su necesidad de mantenimiento. La aplicación de este modelo en diversas carreteras del distrito de Thrissur, India, demostró su eficacia para identificar y priorizar tramos críticos, evidenciando la utilidad del FAHP como herramienta científica en la gestión de pavimentos.

Ali et al. (2022) En la investigación titulada: *Predicting Pavement Condition Index Using Fuzzy Logic Technique*. Como se reporta que, se han desarrollado sistemas basados en lógica difusa que utilizan variables de entrada clave —como ahuellamiento, agrietamiento (fatiga, bloques, longitudinal, transversal), baches, parcheo, sangrado y desprendimiento—, transformándolas en conjuntos difusos con funciones de pertenencia triangulares. Las relaciones entre estos parámetros de deterioro y el Índice de Condición del Pavimento (PCI) se modelan mediante reglas lingüísticas del tipo SI-ENTONCES, que capturan el conocimiento experto. El proceso de defuzzificación, realizado mediante el método de promedio ponderado, traduce este resultado difuso en un valor numérico del PCI.

La efectividad de estos modelos se valida mediante métricas de rendimiento como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE), demostrando su capacidad para mejorar la consistencia y reducir la subjetividad en la predicción del PCI y la posterior planificación de mantenimiento de redes viales.

### **2.1.2. Antecedentes teóricos Nacionales**

Almonte Baca & Olivares García (2023) en la tesis “*Correlación entre los indicadores PCI e IRI del pavimento flexible en el tramo de la red vial 28b Calca-Cusco 2022*” se analizó la correlación existente entre el Índice de Condición del Pavimento (PCI) y el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en una longitud de 4.1 km de pavimento flexible. La metodología comparó dos métodos para la obtención del IRI: el método convencional con Rugosímetro de Merlin y el uso del aplicativo móvil Roadroid. Los resultados de la evaluación evidenciaron un estado de conservación 'muy malo', con valores de PCI entre 13.40 y 15.74, y niveles de rugosidad también críticos (IRI >

5.0 m/km con Merlin). El análisis estadístico determinó una correlación fuerte ( $r=0.5236$ ) entre el PCI y el IRI obtenido con el Rugosímetro de Merlin. Sin embargo, al correlacionar el PCI con los datos de Roadroid, se obtuvo una correlación moderada para el eIRI ( $r=0.4653$ ) y el cIRI ( $r=0.3455$ ).

González Gutiérrez & Contreras Baca (2022) en la investigación de tesis: “*Correlación del IRI - PSI - PCI del pavimento flexible de la av. José María Arguedas del distrito de San Jerónimo – Andahuaylas 2022*” se evaluó la interdependencia entre los índices IRI, PSI y PCI para determinar la influencia de las fallas superficiales en la serviciabilidad de la Av. José María Arguedas. Bajo un enfoque exploratorio y aplicativo-descriptivo, el estudio demostró estadísticamente la existencia de una correlación positiva considerable ( $r=0.692$ ) entre la condición superficial (fallas) y la rugosidad (IRI). Asimismo, se reportó una correlación de  $r=0.588$  entre la rugosidad y la serviciabilidad. La investigación concluyó que el deterioro físico del pavimento influye significativamente en su regularidad superficial y, por consecuencia, en la calidad del servicio ofrecido al usuario.

### **2.1.3. Antecedentes teóricos Locales**

Tingal Limay (2021) En su investigación de tesis: “*Correlación entre los indicadores PCI e IRI del pavimento flexible en el tramo de la red vial 28b calca-Cusco 2022*” realizada sobre el pavimento flexible de la vía Cajamarca – Baños del Inca, se analizó el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) con el objetivo de verificar las condiciones de transitabilidad y confort. La metodología integró inspección visual, estudios de tráfico y topografía, utilizando el Rugosímetro de Merlin para la toma de datos cada dos metros en tramos de 400 m.

Los resultados determinaron valores de rugosidad altamente satisfactorios: 1.07 m/km para el carril de ida y 1.10 m/km para el de vuelta. El estudio concluyó que el Rugosímetro de Merlin constituye una herramienta eficiente y de bajo costo para la caracterización superficial, validando su uso para diagnósticos de serviciabilidad en pavimentos asfálticos de la región.

Briones Pompa (2025) en la investigación de tesis: “*Evaluación del estado actual del pavimento flexible en la Av. Independencia, tramo: Jr. Sucre – Av. Héroes del Cenepa, Cajamarca*

aplicando los métodos PCI y VIZIR” el investigador realizó un estudio en la Av. Independencia de Cajamarca, específicamente en el tramo comprendido entre el Jr. Sucre y la Av. Héroes del Cenepa. Debido al constante tránsito, el pavimento presentó múltiples deterioros como piel de cocodrilo, fisuras por fatiga, bacheos y abultamientos. Para diagnosticar su condición superficial, se aplicaron los métodos PCI y VIZIR. El método PCI consistió en dividir el tramo en unidades de muestra, determinar la severidad de las fallas, calcular áreas afectadas y deducir el índice corregido, obteniendo un valor promedio de 46.5, lo que clasifica el estado del pavimento como regular. Por su parte, el método VIZIR evaluó 28 muestras segmentadas cada 100 metros, registrando patologías estructurales y funcionales, y determinando un índice de deterioro superficial de 3, también clasificado como regular. Este estudio resalta la utilidad de métodos combinados para caracterizar el estado funcional de pavimentos flexibles, siendo un aporte importante para la toma de decisiones en el mantenimiento vial urbano.

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. *Soft computing*

(Chaturvedi, 2015) La computación blanda (Soft Computing) es un campo multidisciplinario de la informática que se ocupa de problemas complejos utilizando soluciones inexactas. Según (Kurhe A.B et al., s/f) Abarca técnicas como la lógica difusa, las redes neuronales y los algoritmos evolutivos. A diferencia de la computación dura, la computación blanda es tolerante a la imprecisión, la incertidumbre y la verdad parcial, con la mente humana como modelo a seguir. La principal ventaja de la computación blanda radica en su capacidad para resolver problemas no lineales sin modelos matemáticos precisos e incorporar el conocimiento humano a la computación. La lógica difusa, un componente clave de la computación blanda, puede manejar información incierta e imprecisa. Las técnicas de computación blanda a menudo son complementarias y pueden combinarse para abordar problemas demasiado complejos para los métodos matemáticos convencionales. Las aplicaciones de

la computación blanda incluyen el procesamiento de imágenes, el diagnóstico médico y la educación (Haußecker & Tizhoosh, 2000).

### ***2.2.2. Lógica Difusa***

La lógica difusa, propuesta por Zadeh (1965), amplía la lógica clásica al permitir valores de verdad intermedios entre 0 y 1, lo cual es útil para modelar fenómenos donde la información es imprecisa o incierta. Esta característica la hace especialmente relevante en contextos complejos como el diagnóstico médico, los sistemas de control y la evaluación de infraestructura vial. Según Alaminos-Fernández (2023) la lógica difusa permite asignar grados de certeza a afirmaciones, lo que resulta adecuado para describir realidades donde los límites no son claramente definidos, como en la clasificación de la altura de una persona. Su aplicación en el mantenimiento vial se da mediante métodos como el FAHP y el FWA, que permiten evaluar pavimentos con datos incompletos o subjetivos como lo plantea Singh et al. (2018).

El funcionamiento de la lógica difusa se basa en operaciones como la unión, intersección, negación e implicación difusa, y en reglas difusas que permiten modelar y razonar en condiciones de incertidumbre

### ***2.2.3. Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (FAHP)***

El término FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) es una técnica de toma de decisiones multicriterio (MADM) que extiende el método AHP (Analytic Hierarchy Process) tradicional propuesto por Saaty (1990) al incorporar teoría de conjuntos difusos para manejar la imprecisión y subjetividad de los juicios humanos.

El método descrito constituye una evolución del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), denominándose "Difuso" debido a su capacidad para manejar la imprecisión inherente al juicio humano. A diferencia de enfoques rígidos, este sistema acepta que las valoraciones humanas rara vez son categóricas o numéricamente exacta (Vistrain, 2024)

Del mismo modo se puede emplear este método para una evaluación jerárquica con múltiples niveles, donde existe diferentes clasificaciones y/o criterios de evaluación.

#### **2.2.4. Fundamentos matemáticos del FAHP**

##### **2.2.4.1. Números difusos**

Un número difuso representa un conjunto de valores posibles, cada uno asociado a un grado de pertenencia que varía entre 0 y 1

Un número triangular difuso  $\tilde{A}$  se denota como:

$$\tilde{A} = (l, m, u)$$

Donde:

- $l$ : límite inferior,
- $m$ : valor modal (más probable)
- $u$ : límite superior

Un número trapezoidal difuso es una extensión del número triangular difuso que permite representar un rango de valores centrales con el mismo grado de pertenencia

$$\tilde{A} = (a, b, c, d)$$

Donde:

- $a$ : límite inferior donde la pertenencia es 0
- $b$ : inicio del núcleo (donde la pertenencia es 1)
- $c$ : fin del núcleo (también con pertenencia 1)
- $d$ : límite superior donde la pertenencia regresa a 0

##### **2.2.4.2. Conjuntos Difusos**

Según Zadeh Los conjuntos difusos se caracterizan por una función de membresía  $\mu$ , cuyo rango está en el intervalo real  $[0, 1]$ , cuánto más se acerca a 1 el grado de membresía de un elemento, éste está más posiblemente (o certamente) incluido en el conjunto. Así, 0 es la medida de completa exclusión y 1 la de completa inclusión

Dichas funciones pueden tomar formas distintas, entre las cuales las más prevalentes son triangular, trapezoidal, gaussiana o sigmoidal.

#### 2.2.4.3. La función triangular

La fórmula para la función de pertenencia triangular es la siguiente:

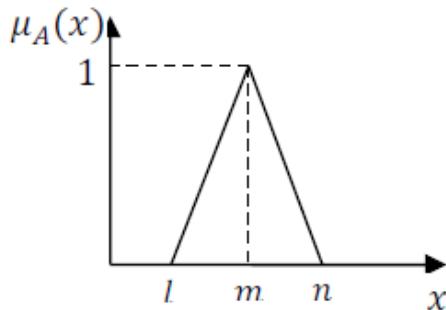
**Ecuación 1:** Función de pertenencia triangular

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < l \\ \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m < x \leq u \\ 0, & x > u \end{cases}$$

Donde  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  es el grado de pertenencia del número difuso triangular  $\tilde{A}$  en el punto  $x$ .

**Figura 1**

Función de membresía triangular



*Nota: Adaptado de Introducción a la teoría de conjuntos difusos y sus aplicaciones en investigación social e IA, por Alaminos-Fernández (2023)*

#### 2.2.4.4. La función trapezoidal

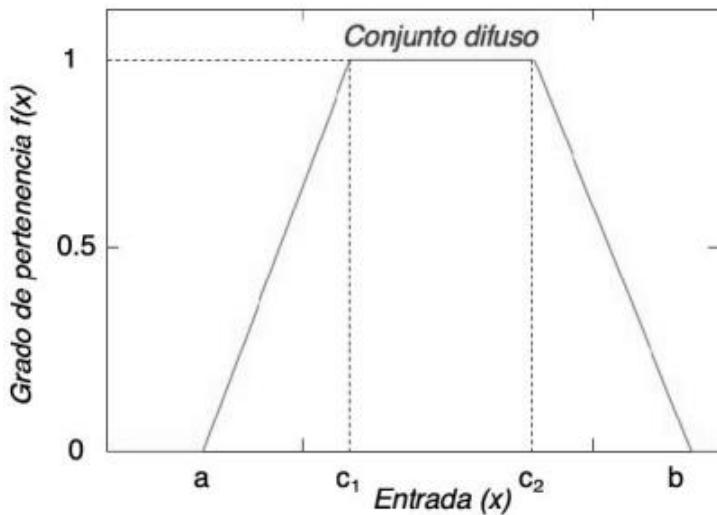
La función de pertenencia del número difuso trapezoidal se define como sigue:

**Ecuación 2:** Función de pertenencia Trapezoidal

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases}$$

**Figura 2**

*Distribución de la Función Trapezoidal*



Nota: Adaptado de *Introducción a la teoría de conjuntos difusos y sus aplicaciones en investigación social e IA*, por Alaminos-Fernández (2023)

#### 2.2.4.5. Matriz de comparación por pares

La matriz de comparación pareada difusa es una extensión de la matriz tradicional del método AHP propuesta por Saaty, utilizada para capturar la incertidumbre y ambigüedad presentes en los juicios humanos mediante el uso de números difusos, usualmente números triangulares difusos (TFN)

Una matriz de comparación pareada difusa  $\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}]$  de orden  $n \times n$ , está compuesta por elementos difusos  $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, n_{ij})$ , donde:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \cdots & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

Donde:

- $l_{ij}$ : Valor mínimo estimado de la comparación
- $m$ : Valor medio estimado de la comparación
- $n_{ij}$ : Valor máximo estimado de la comparación

Los elementos diagonales son iguales a  $(1,1,1)$ , ya que un elemento comparado consigo mismo tiene igualdad absoluta. Además, la matriz cumple la reciprocidad difusa, es decir:

### Ecuación 3: Reciprocidad difusa

$$\tilde{a}_{ij} = \left( \frac{1}{n_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}} \right)$$

Esto significa que, si el criterio  $i$  es "moderadamente más importante" que el criterio  $j$ , entonces  $j$  es "moderadamente menos importante" que  $i$ , pero en términos difusos.

#### 2.2.4.6. Escala lingüística difusa

La matriz se construye generalmente a partir de juicios verbales (por ejemplo, "moderadamente más importante") que se transforman en TFN utilizando una escala lingüística difusa. A continuación, se presenta una escala basada en la literatura de Chang (1996).

**Tabla 3**

*Escala lingüística difusa*

Juicio verbal	TFN correspondiente
Igual importancia	(1, 1, 1)
Ligera importancia	(1, 2, 3)
Moderada importancia	(2, 3, 4)
Fuerte importancia	(4, 5, 6)
Muy fuerte importancia	(6, 7, 8)
Importancia extrema	(8, 9, 10)

*Nota:* Tomado de *Chang (1996)*

#### 2.2.4.7. Consistencia de matriz pareada

Para medir la consistencia de una matriz pareada, se utilizan principalmente dos indicadores: Índice de consistencia (IC) y la Razón de consistencia (RC). Para poder encontrar la consistencia de una matriz es necesario obtener la multiplicación de la Matriz de comparación pareada ( $A$ ) y el vector de prioridades ( $w$ ), para proceder con la aplicación de las siguientes fórmulas matemáticas:

Cálculo del valor propio máximo:

### Ecuación 4: Valor propio Máximo

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(A * w)_i}{w_i} \right)$$

Calculo el Índice de Consistencia (IC):

**Ecuación 5:** Índice de Consistencia

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Donde “ $n$ ” es el número de filas o columnas de la matriz cuadrada.

Calculo la Razón de Consistencia (RC)

**Ecuación 6:** Razón de Consistencia

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

Donde ICA es el Índice de Consistencia Aleatorio, que depende del tamaño de la matriz  $n$ . A continuación, se presenta la tabla de valores:

**Tabla 4**

*Valores de ICA*

<b>n</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>RI</b>	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

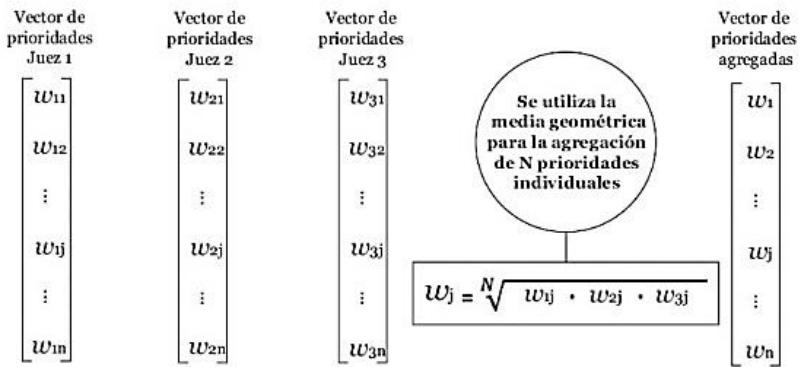
*Nota: Las estimaciones fueron hechas por Saaty*

#### 2.2.4.8. Agregación de Prioridades Individuales (AIP)

Según Forman & Peniwati (1998), La agregación de prioridades individuales (AIP) es un método utilizado en la toma de decisiones grupales, especialmente en el contexto del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), para combinar las preferencias individuales de diferentes tomadores de decisiones en una única prioridad grupal

Transforma vectores de prioridad individuales en un vector de prioridad del grupo, como se muestra en la figura:

**Figura 3**  
*Agregación de prioridades individuales*



Nota: Adaptado de *Modelo Multicriterio Aplicado A La Toma De Decisiones Representables En Diagramas De Ishikawa* por Bernal Romero & Niño Sanabria (2018)

#### 2.2.4.9. Método de Análisis de Extensión Con Números Difusos Triangulares

Chang (1996) introduce el Método de análisis por extensión (Extent Analysis Method) o el EAM se basa en el concepto de síntesis difusa para obtener vectores de prioridad. Se parte de una matriz de comparación difusa  $A = (a_{ij})$ , donde cada  $a_{ij}$  es un TFN. Luego, se calcula el valor sintético para cada alternativa  $i$ :

**Ecuación 7:** Valor Sintético Difuso

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j * \left[ \sum_{i=l}^n \sum_{j=l}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

- $S_i$ : Valor sintético difuso del objeto  $i$
- $M_{gi}^j$ : Valor difuso de extensión del  $i$ -ésimo objeto para el  $j$ -ésimo criterio
- $n$ : Número de alternativas
- $m$ : Número de criterios

Este valor representa la importancia relativa de cada alternativa considerando todos los criterios. Luego se calcula el grado de posibilidad de que un número difuso  $M_1$  sea mayor o igual a  $M_2$  como:

**Ecuación 8:** *Grado de posibilidad*

$$V(S_1 \geq S_2) = \begin{cases} 1, & \text{si } m_1 \geq m_2 \\ 0, & \text{si } l_2 \geq u_1 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, & \text{en otro caso} \end{cases} \dots \dots \dots \quad (8)$$

Donde:

- $S_i$ : Valor sintético difuso del objeto i
- $l$ : Valor inferior (lower limit) del número difuso
- $m$ : Valor modal (más probable) del número difuso
- $u$ : Valor superior (upper limit) del número difuso

Posteriormente el vector de prioridad final se normaliza como:

**Ecuación 9:** Normalización de Vector de Pesos

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \dots \dots \dots \quad (3)$$

Donde:

- $W$ : Vector de pesos normalizado
- $d$ : Valor mínimo del grado de posibilidad
- $A_1$ : Alternativa
- $T$ : Complejidad temporal

#### 2.2.4.10. Vector de evaluación Global

Esta es una multiplicación vector por matriz, es decir:

**Ecuación 10:** *Vector de evaluación Global*

$$Y = W * R = [w_1, w_2, w_3] * \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Donde:

- W: Vector de pesos normalizados
- R: Matriz de relación difusa

#### 2.2.4.11. Defuzzificación

Para este proceso se puede aplicar la fórmula del centroide (también llamado centro de gravedad o Center of Area, COA) es el más usado en sistemas difusos, porque proporciona un valor representativo del conjunto difuso de salida.

**Ecuación 11:** Fórmula del Centroide para Números Triangulares

$$z^* = \frac{l + m + u}{3}$$

Dónde:

- $l$ : Valor inferior del número difuso
- $m$ : Valor modal del número difuso
- $u$ : Valor superior del número difuso

Los resultados son ordenados de mayor a menor o de menor a mayor según los rangos de evaluación.

#### 2.2.5. *Método del Promedio Ponderado Difuso (Fuzzy Weighted Average)*

El Método del Promedio Ponderado Difuso (Fuzzy Weighted Average) es un método desarrollado por Dong & Wong (1987), basado en el principio de extensión, que permite combinar un conjunto de valores difusos asociados a determinados pesos (también difusos o crisp) en un único valor difuso representativo. Su fundamento radica en extender la noción clásica de promedio ponderado al marco de los números difusos, de manera que las incertidumbres y ambigüedades inherentes a los juicios humanos puedan ser modeladas adecuadamente.

Formalmente, el método calcula el promedio ponderado de un conjunto de números difusos  $\tilde{x}_i$  con pesos  $w_i$  generando como resultado un nuevo número difuso  $\tilde{X}$  que refleja la agregación global

de la información. Esto lo convierte en una herramienta fundamental en procesos de toma de decisiones multicriterio, evaluación y priorización, donde los datos provienen de juicios lingüísticos o imprecisos

### **2.2.6. Base matemática del FWA**

#### **2.2.6.1. Promedio ponderado difuso $\tilde{X}$**

La Fórmula general del FWA, está dada por la siguiente ecuación:

**Ecuación 12: Fórmula general Promedio Ponderado Difuso**

$$\tilde{X} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i * R_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Donde:

- $R_i$ : Valor difuso del Criterio
- $W_i$ : Peso difuso del Criterio
- $n$ : Número de criterios

#### **2.2.6.2. Método de Suma de rangos (Rank Sum)**

En esta técnica, se calcula un peso basado en el rango de cada elemento. El elemento con el rango más bajo (el más importante) recibe el peso más alto, a medida que aumenta el rango (disminuye la importancia), el peso disminuye. La fórmula para calcular el peso ( $W$ ) para un rango dado ( $r$ ) y un número total de elementos ( $n$ ) es:

**Ecuación 13: Método de suma de rangos**

$$w_i = \frac{n - r_i + 1}{\sum_{j=1}^n (n - r_j + 1)}$$

### **2.2.7. Método PCI**

El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un pavimento fallido o en mal estado, hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado. En la Tabla 5 se presentan los rangos

de PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento (Vásquez Varela, 2002).

El cálculo del PCI se fundamenta en los resultados de un inventario visual de la condición del pavimento en el cual se establecen CLASE, SEVERIDAD y CANTIDAD de cada daño presente. El PCI se desarrolló para obtener un índice de la integridad estructural del pavimento y de la condición operacional de la superficie. La información de los daños obtenida como parte del inventario ofrece una percepción clara de las causas de los daños y su relación con las cargas o con el clima (Vásquez Varela, 2002).

**Tabla 5**  
*Rangos de Calificación del PCI*

<b>Rango</b>	<b>Clasificación</b>
100-85	Excelente
85-70	Muy Bueno
70-55	Bueno
55-40	Regular
40-25	Malo
25-10	Muy Malo
10-0	Fallado

*Nota:* Adaptado de *Manual PCI* por Vásquez Varela (2002).

#### **2.2.8. Procedimiento de cálculo PCI**

##### **2.2.8.1. Unidades de muestreo**

###### **A. División en unidades de muestreo (UM).**

Se divide la sección vial en unidades de muestreo de área homogénea (usualmente 230 ± 93 m<sup>2</sup>).

###### **B. Determinación de Unidades de Muestreo.**

El número mínimo de unidades de muestreo que deben evaluarse se obtiene mediante la ecuación:

**Ecuación 14:** Número de unidades de Muestreo

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

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, se asume 10 para pavimento asfáltico.

**C. Selección de las Unidades de Muestreo para Inspección.**

Se recomienda que las unidades elegidas estén igualmente espaciadas. De la siguiente manera:

**Ecuación 15:** Intervalo de Muestreo

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

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.

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

**D. Evaluación de la Condición.**

Se identifica, clasifica y cuantifica cada tipo de deterioro presente en la Unidad de Muestreo utilizando el equipo de inspección correspondiente, luego se registra: tipo de falla, severidad (baja/media/alta) y cantidad (área, longitud o número).

## 2.2.8.2. Cálculo de PCI de las Unidades de Muestreo

### A. Cálculo del Valor Deducido (VD).

Se totaliza el tipo y nivel de daño, para cada tipo de deterioro, se calcula la densidad (%) como el porcentaje de la Unidad de Muestreo afectada. Finalmente se determina el VD individual de cada falla a partir de tablas/gráficas específicas que relacionan tipo, severidad y densidad.

### B. Cálculo del Número Máximo Admisible de Valores Deducidos (m).

Si hay múltiples valores deducidos, no todos contribuyen plenamente de forma acumulativa, pues varias fallas pequeñas no degradan igual que una muy severa. Este m se calcula mediante la ecuación 15.

**Ecuación 16:** Número máximo admisible de valores deducidos

$$m = 1 + \left( \frac{9}{98} \right) * (100 - HDV)$$

Donde:

- HDV: valor deducido individual más alto de la unidad

### C. Cálculo del Valor Deducido Corregido (CDV).

Si hay varias fallas, se combinan sus VD usando un procedimiento iterativo definido en ASTM D6433 para obtener un CDV, evitando sobrepenalización.

### D. Cálculo del PCI.

Se calcula con la fórmula:  $PCI = 100 - CDV$ . El resultado se redondea al número entero más cercano.

## 2.2.9. Fallas consideradas para el PCI

### 2.2.9.1. Piel de Cocodrilo

**Tabla 6**

*Piel de cocodrilo (grietas por fatiga)*

<b>Descripción</b>	Grietas de fatiga interconectadas que forman polígonos con ángulos agudos, semejantes a una piel de cocodrilo. Se originan por la falla por fatiga de la capa asfáltica bajo cargas repetidas, iniciando en el fondo de la capa y propagándose a la superficie. Ocurren típicamente en las huellas de ruedas (áreas sujetas a tráfico) y representan un daño estructural severo, a menudo acompañado de ahuellamiento.
<b>Severidad Baja</b>	Grietas finas longitudinales, pocas o ninguna interconectada, sin descascaramiento (sin rotura en los bordes). Ver Figura 4 (a)
<b>Severidad Media</b>	Mayor interconexión de grietas formando malla; grietas de ancho moderado con leve descascaramiento de bordes. Ver Figura 4 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Red de grietas bien definida, con piezas delimitadas por grietas amplias y bordes descascarados; algunos fragmentos pueden moverse bajo el tránsito. Ver Figura 4 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) de pavimento agrietado

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 4**

*Severidad de falla Piel de Cocodrilo*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.2. Exudación

**Tabla 7**

### *Exudación*

<b>Descripción</b>	Película de material bituminoso que aflora a la superficie, formando una capa brillante, reflectiva y usualmente pegajosa. Es causada por exceso de asfalto en la mezcla o sellador, o por bajo contenido de vacíos en el asfalto, lo cual permite que en temperaturas altas el asfalto llene los vacíos y se expanda a la superficie. En tiempo frío el proceso no revierte, acumulándose el asfalto en la superficie.
<b>Severidad Baja</b>	Exudación muy ligera, detectable solo unos pocos días al año; el asfalto no se adhiere a zapatos ni vehículos. Ver Figura 5 (a)
<b>Severidad Media</b>	Exudación tal que el asfalto se pega a zapatos y vehículos durante unas pocas semanas al año. Ver Figura 5 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Exudación extensa; el asfalto se adhiere en gran cantidad a vehículos y calzado por varias semanas al año. Ver Figura 5 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) de superficie afectada. (Nota: si se registra exudación, no se debe contabilizar pulimento de agregados en la misma zona.)

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 5**

### *Severidad de falla Exudación*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

### 2.2.9.3. Agrietamiento en bloque

**Tabla 8**

*Agrietamiento en bloque*

<b>Descripción</b>	Grietas interconectadas que dividen el pavimento en bloques aproximadamente rectangulares (entre ~0,3 m y 3 m de lado). Se deben principalmente a la contracción del asfalto por cambios térmicos diarios y endurecimiento del ligante, más que a las cargas de tránsito. Suelen cubrir áreas extensas, incluso zonas sin tráfico, a diferencia de la piel de cocodrilo que genera piezas más pequeñas en áreas cargadas.
<b>Severidad Baja</b>	Bloques delimitados por grietas de baja severidad (según criterio de grietas longitudinales/transversales, es decir, grietas estrechas). Ver Figura 6 (a)
<b>Severidad Media</b>	Bloques delimitados por grietas de severidad media (anchura moderada, posiblemente con algún deterioro en bordes). Ver Figura 6 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Bloques formados por grietas de alta severidad (grietas anchas, con bordes muy deteriorados o fragmentados). Ver Figura 6 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) agrietada en bloque. ( <i>Si coexistieran distintos niveles de severidad en una sección, medir por separado cada zona.</i> )

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 6**

*Severidad de falla Agrietamiento en Bloque*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.4. Abultamientos y hundimientos

**Tabla 9**

*Abultamientos y hundimientos (bumps and sags)*

<b>Descripción</b>	Deformaciones localizadas; los abultamientos son desplazamientos pequeños hacia arriba en la superficie, y los hundimientos son desplazamientos pequeños y abruptos hacia abajo. Un abultamiento genera una ondulación (corrugación) si se repite en serie perpendicular al tráfico con intervalo < 3 m. Los abultamientos pueden originarse por combadura de losas de concreto bajo la capa asfáltica, expansión por congelamiento (hielo) o infiltración de material bajo la superficie (efecto “tenting”). Los hundimientos suelen indicar zonas localmente asentadas; deformaciones amplias (longitud >3 m) se catalogan aparte como <i>hinchamiento</i> .
<b>Severidad Baja</b>	Abultamiento/hundimiento casi imperceptible, afecta muy levemente la calidad de rodadura (molestia de baja severidad al tránsito). Ver Figura 7 (a)
<b>Severidad Media</b>	Deformación apreciable que provoca irregularidad moderada al pasar (calidad de tránsito de severidad media). Ver Figura 7 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Deformación pronunciada que causa fuerte golpe o incomodidad al tránsito (alta severidad en calidad de rodaje). Ver Figura 7 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Longitud (m) de deformación lineal. ( <i>Se mide en metros lineales; si forman un patrón transversal repetitivo &lt;3 m se clasifica como corrugación</i> )

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 7**

*Severidad de falla Abultamientos y hundimientos*



Nota: Adaptado de *Pavement Managemet* por Shahin (2005)

## 2.2.9.5. Corrugación

**Tabla 10**

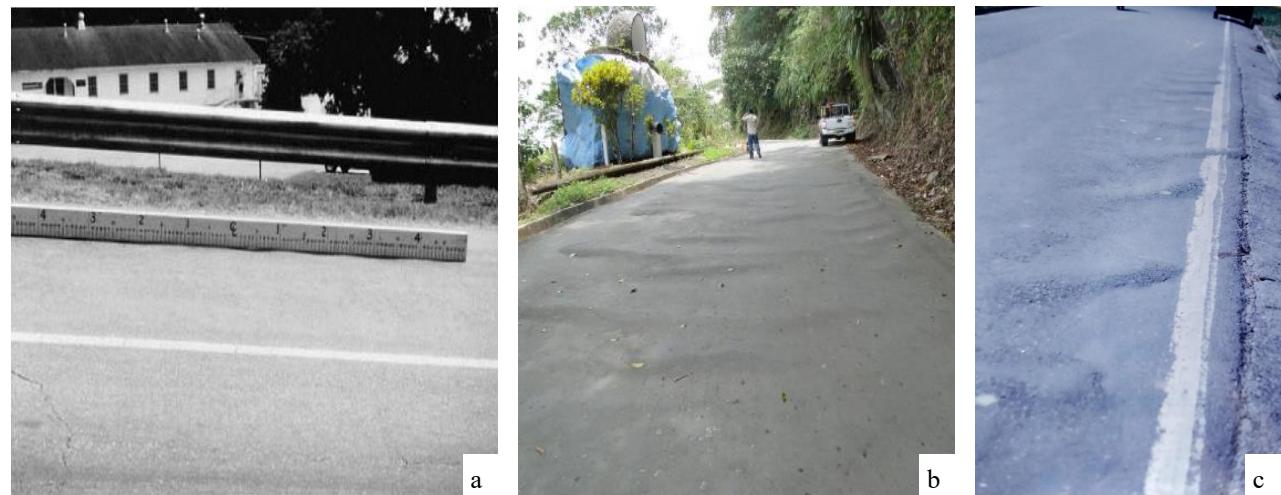
### Corrugación (*lavadero*)

<b>Descripción</b>	Serie de ondulaciones cortas: cimas y depresiones espaciadas regularmente (típicamente < 3 m entre crestas) y perpendiculares al eje de la vía. Es básicamente un patrón de <i>abultamientos</i> recurrentes causado por tráfico sobre capas asfálticas o bases inestables. Se manifiesta como un <i>lavado de tabla</i> en la superficie (pequeñas “olas” sucesivas).
<b>Severidad Baja</b>	Corrugaciones apenas afectan la comodidad de marcha (molestia leve). Ver Figura 8 (a)
<b>Severidad Media</b>	Corrugaciones causan vibración/modulación apreciable al circular (molestia moderada). Ver Figura 8 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Corrugaciones muy marcadas, provocan gran perturbación en la rodadura (molestia severa al tránsito). Ver Figura 8 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) de pavimento con corrugación.

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 8**

### Severidad de falla Corrugación



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.6. Depresión

**Tabla 11**

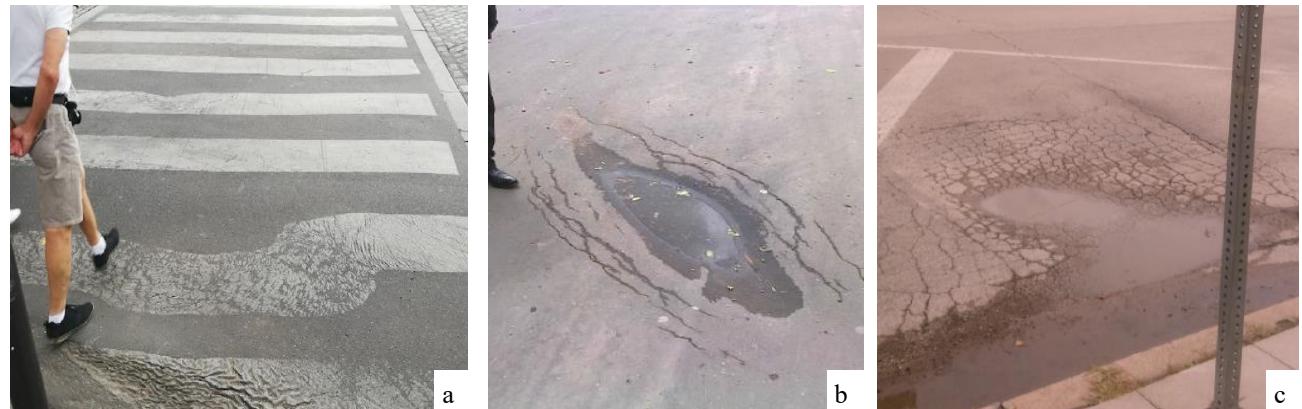
### Depresión

<b>Descripción</b>	Zona localizada donde la superficie del pavimento está a un nivel inferior al de las áreas circundantes. Las depresiones de poca profundidad pueden ser difíciles de notar en seco, pero se evidencian tras la lluvia al formar charcos (“baño de pájaros”). Su origen suele estar en asentamientos de la subrasante o fallos constructivos, y provocan irregularidad al rodar; si son profundas o acumulan agua pueden inducir hidroplaneo. (Nota: se diferencian de los <i>hundimientos</i> por ser menos abruptas).
<b>Severidad Baja</b>	Profundidad de ~13 a 25 mm. Ver Figura 9 (a)
<b>Severidad Media</b>	Profundidad de ~25 a 51 mm. Ver Figura 9 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Profundidad > 51 mm. Ver Figura 9 (c)
<b>Unidad de medida</b>	Área ( $m^2$ ) de la depresión.

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 9**

### Severidad de falla Depresión



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.7. Grieta de Borde

**Tabla 12**

*Grieta de borde*

<b>Descripción</b>	Grieta paralela al eje de la vía, ubicada generalmente a 0,30–0,60 m del borde exterior del pavimento. Suele iniciarse y empeorar por debilitamiento de la base o subrasante cerca del borde (por infiltraciones, clima) combinado con las cargas de tránsito en ese borde. El área entre la grieta y el borde suele agrietarse y fragmentarse; en casos severos los pedazos entre grieta y filo del pavimento pueden desprenderse.
<b>Severidad Baja</b>	Grieta angosta (baja severidad) o moderada sin pérdida de material ni fragmentación a lo largo del borde. Ver Figura 10 (a)
<b>Severidad Media</b>	Grieta de ancho medio con algo de fragmentación o desprendimiento de material adyacente al borde. Ver Figura 10 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Grieta con fuerte deterioro: considerable fragmentación y desprendimiento del pavimento junto al borde, pudiendo faltar secciones junto al filo. Ver Figura 10 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Longitud (m) de grieta de borde.

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 10**

*Severidad de falla Rotura de Borde*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.8. Grieta de reflexión de junta

**Tabla 13**

*Grieta de reflexión de junta (en sobrecapas asfálticas sobre PCC)*

<b>Descripción</b>	Grieta que refleja la ubicación de juntas o grietas de una losa de concreto (PCC) subyacente a un pavimento asfáltico. Ocurre solo en asfalto colocado sobre lasas de concreto de cemento Pórtland (no aplica a bases estabilizadas con cemento/cal). Es causada por movimientos de la losa (dilatación/contracción térmica o por humedad) que generan tensiones en la capa asfáltica. No es un agrietamiento por carga, aunque el tráfico puede descascarar el borde de la grieta en la capa asfáltica.
<b>Severidad Baja</b>	<b>(a)</b> Grieta sin sellar < 10 mm de ancho, <b>o (b)</b> grieta sellada (cualquier ancho) con material de sellado en buen estado. Ver Figura 11 (a)
<b>Severidad Media</b>	<b>(a)</b> Grieta sin sellar de 10 a 76 mm de ancho; <b>o (b)</b> grieta sin sellar ( $\leq 76$ mm) con leve agrietamiento secundario alrededor; <b>o (c)</b> grieta sellada con leve agrietamiento aleatorio adyacente. Ver Figura 11 (b)
<b>Severidad Alta</b>	<b>(a)</b> Grieta (sellada o no) rodeada de agrietamiento aleatorio de severidad media o alta; <b>o (b)</b> grieta sin sellar > 76 mm de ancho; <b>o (c)</b> grieta con el pavimento circundante severamente fracturado (material suelto). Ver Figura 11 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Longitud (m) de grieta reflejada. ( <i>Se registra la longitud de cada grieta por nivel de severidad; si una grieta presenta tramos con distinta severidad, medir por separado cada tramo.</i> )

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 11**

*Severidad de falla Grieta de reflexión de junta*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.9. Desnivel

**Tabla 14**

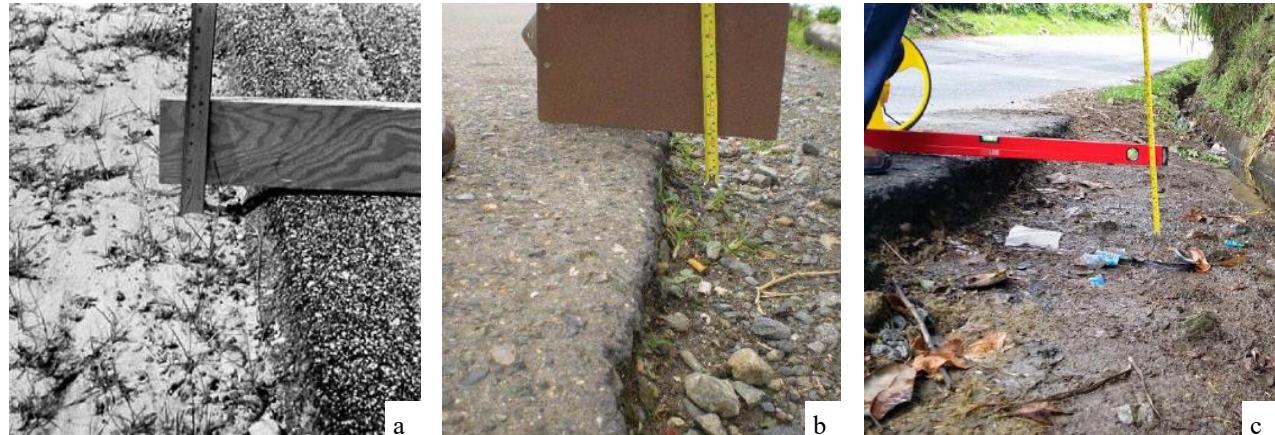
*Desnivel carril/berma*

<b>Nombre de la falla</b>	Desnivel carril/berma
<b>Descripción</b>	Diferencia de altura entre el borde del pavimento (carril) y el hombro o berma no pavimentada adyacente. Se produce por erosión o asentamiento del material de berma, o tras sobrecarpetas asfálticas sin ajuste de nivel en el hombro. Esto crea un escalón en el borde que puede afectar la seguridad y el drenaje.
<b>Severidad Baja</b>	Diferencia de nivel de 25 a 51 mm. Ver Figura 12 (a)
<b>Severidad Media</b>	Diferencia de 51 mm hasta ~102 mm. Ver Figura 12 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Diferencia mayor que ~102 mm. Ver Figura 12 (c)
<b>Unidad de medida</b>	Longitud (m) de borde con desnivel

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 12**

*Severidad de falla Desnivel*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.10. Grietas Longitudinales y Transversales

**Tabla 15**

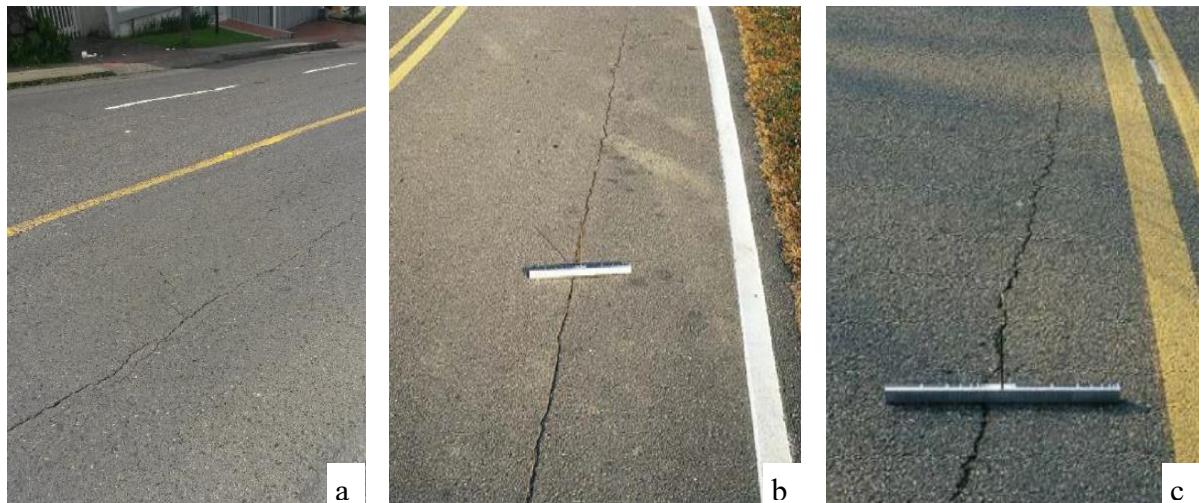
*Grietas longitudinales y transversales (no relacionadas con juntas de concreto)*

<b>Descripción</b>	Grietas longitudinales (paralelas al eje de la vía o al sentido de colocación) y transversales (aprox. perpendiculares al eje) que no provienen de juntas de losas de concreto. Las longitudinales pueden originarse por: (1) juntas de construcción mal ejecutadas entre carriles contiguos, (2) contracción del asfalto por enfriamiento o envejecimiento del ligante, (3) grietas reflejadas desde capas inferiores (p. ej. grietas en bases tratadas o en lasas PCC subyacentes, pero <b>no</b> juntas de PCC). Las grietas transversales suelen ser por contracción térmica del asfalto y normalmente no están asociadas a carga de tránsito.
<b>Severidad Baja</b>	<b>(a)</b> Grieta sin relleno < 10 mm de ancho, <b>o</b> <b>(b)</b> grieta sellada (cualquier ancho) con material de sellado en buen estado. Ver Figura 13 (a)
<b>Severidad Media</b>	<b>(a)</b> Grieta sin relleno de 10 a 76 mm de ancho; <b>o</b> <b>(b)</b> grieta sin relleno ( $\leq 76$ mm) con pequeñas grietas secundarias alrededor; <b>o</b> <b>(c)</b> grieta sellada con algunas fisuras aleatorias pequeñas adyacentes. Ver Figura 13 (b)
<b>Severidad Alta</b>	<b>(a)</b> Cualquier grieta (sellada o no) acompañada de grietas aleatorias adyacentes de severidad media/alta; <b>o</b> <b>(b)</b> grieta sin relleno $> 76$ mm; <b>o</b> <b>(c)</b> grieta donde el pavimento circundante está severamente agrietado o fragmentado (material suelto). Ver Figura 13 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Longitud (m) de grietas longitudinales/transversales. ( <i>Cada grieta se mide registrando por separado sus tramos de distinta severidad.</i> )

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 13**

*Severidad de falla Grietas Longitudinales y Transversales*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.11. Parcheo y Acometidas de Servicios

**Tabla 16**

*Parcheo y acometidas de servicios (reparaciones)*

<b>Descripción</b>	Área de pavimento reparada con material nuevo para sustituir el original dañado. Se considera un <b>defecto</b> en sí mismo sin importar qué tan bien esté construido, pues usualmente el parche (o su zona adyacente) no desempeña igual que el pavimento original. Suele presentar ligera rugosidad o desnivel respecto al contiguo. (Incluye parches por baches y zanjas de instalaciones de servicios públicos).
<b>Severidad Baja</b>	El parche está en buen estado, funcional y nivelado; la irregularidad que causa es de baja severidad (rodar sobre él es casi tan cómodo como en pavimento intacto). Ver Figura 14 (a)
<b>Severidad Media</b>	El parche muestra deterioro moderado (fisuras, ligera deformación) o provoca una incomodidad al paso calificable de severidad media. Ver Figura 14 (b)
<b>Severidad Alta</b>	El parche está seriamente deteriorado (agrietado, hundido, desintegrado) o la molestia al circular es de alta severidad; el parche ha fallado y requiere reemplazo pronto. Ver Figura 14 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) parchada. ( <i>Si un parche abarca zonas con distinta severidad, medir áreas separadas por severidad. No se registran otros defectos dentro de un parche; si el material del parche se está desprendiendo o agrietando, igualmente se califica solo como “parcheo”.</i> )

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 14**

*Parcheo y acometidas de servicios*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.12. Pulimiento de Agregados

**Tabla 17**

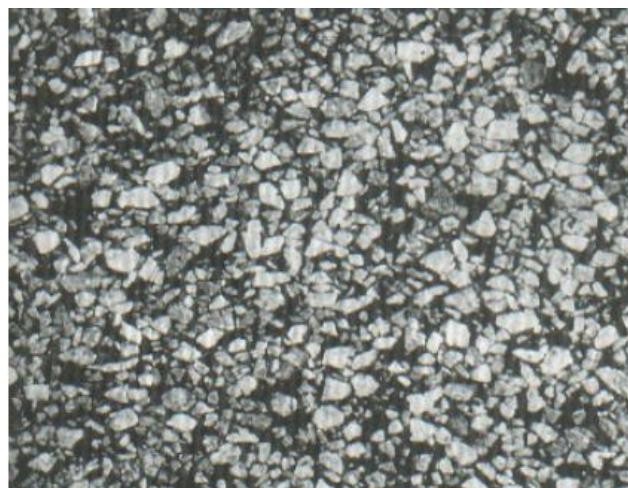
### *Pulimento de agregados*

<b>Descripción</b>	Desgaste de la textura superficial por tráfico repetido, que deja los agregados expuestos <b>suaves al tacto</b> y reduce la fricción llanta-pavimento. Ocurre típicamente cuando el ligante se ha endurecido y la porción de agregado sobresaliente es pequeña, resultando en una textura que ya no contribuye adecuadamente a la tracción. Se identifica al notar la superficie lisa y baja resistencia al deslizamiento (coeficiente de fricción reducido en pruebas).
<b>Severidad</b>	<i>No se definen niveles diferenciados de severidad.</i> Se considera defectuoso cuando el pulido es <b>significativo</b> , es decir, la pérdida de microtextura es suficiente para impactar la seguridad (comprobado visualmente o con valores bajos en ensayos de resistencia al deslizamiento).
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) de superficie pulida. ( <i>Nota: si existe exudación en la misma área, no se contabiliza aparte el pulimento.</i> )

*Nota:* Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 15**

### *Pulimento de agregados*



*Nota:* Adaptado de *Pavement Managemet* por Shahin (2005)

## 2.2.9.13. Huecos

**Tabla 18**

*Huecos (baches)*

<b>Descripción</b>	Depresiones circulares de diámetro generalmente < 0,9 m, con forma de cuenco y bordes definidos. Presentan bordes superiores cortantes y lados casi verticales cerca de la superficie. Se forman cuando el tráfico arranca trozos del pavimento en zonas deterioradas: la desintegración avanza por mezcla deficiente, puntos débiles en base/subrasante, o tras alcanzar la capa asfáltica una condición de fatiga (piel de cocodrilo) muy severa[85]. La presencia de agua acelera su crecimiento (el agua infiltrada agrava la erosión). <b>Nota:</b> Los huecos reflejan un problema estructural y <b>no</b> deben confundirse con desgaste superficial; si provienen de grietas tipo piel de cocodrilo, se registran como huecos (no como meteorización).
<b>Severidad Baja</b>	Huecos pequeños y poco profundos. <i>Criterios PCI:</i> para diámetros < ~0,75 m se considera baja severidad si la profundidad es ~13–25 mm (véase Cuadro 13.1). En general, baches de diámetro reducido con escasa profundidad se clasifican como severidad baja. Ver Figura 16 (a)
<b>Severidad Media</b>	Huecos de tamaño o profundidad intermedios. <i>PCI:</i> con diámetro < ~0,75 m, severidad media si profundidad >25 mm hasta ~50 mm; también un hueco más grande pero poco profundo puede entrar en media. En términos prácticos: baches moderados que afectan la rodadura pero aún manejables. Ver Figura 16 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Huecos grandes y/o muy profundos. <i>PCI:</i> diámetro cercano a 0,75 m y profundidad > ~50 mm se considera alta severidad. Cualquier bache de gran tamaño o que represente un peligro inmediato (agujero pronunciado) es de alta severidad. ( <i>Además, PCI indica que si el diámetro &gt; 0,75 m, debe calcularse cuántos "huecos equivalentes" son, dividiendo el área por 0,47 m<sup>2</sup>; y se usa la profundidad: ≤25 mm = mediana, &gt;25 mm = alta severidad.</i> ) Ver Figura 16 (c)
<b>Unidad de medición</b>	<b>Unidades (número de huecos),</b> contabilizados por severidad. ( <i>Cada bache se cuenta; si es muy grande se convierte a número equivalente de baches estándar según área.</i> )

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 16**

*Huecos*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.14. Cruce de vía férrea

**Tabla 19**

### Cruce de vía férrea

<b>Descripción</b>	Irregularidades en la superficie del pavimento en zonas de cruce de ferrocarril, típicamente <b>depresiones o abultamientos</b> alrededor o entre los rieles. Estas deformaciones resultan del asentamiento del material adyacente a los rieles o del desplazamiento del pavimento por la interacción con los componentes del cruce. Su efecto es una perturbación en la comodidad y seguridad del tránsito al atravesar las vías férreas.
<b>Severidad Baja</b>	El cruce provoca sólo una ligera incomodidad al pasar (irregularidad de baja severidad). Ver Figura 17 (a)
<b>Severidad Media</b>	El cruce genera una perturbación apreciable en el vehículo, de severidad media (golpe/modulación moderada al cruzar). Ver Figura 17 (b)
<b>Severidad Alta</b>	El cruce está muy deformado, causando una sacudida fuerte o riesgo de pérdida de control al pasar (impacto de alta severidad). Ver Figura 17 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) afectada en la zona del cruce. ( <i>Si el cruce no afecta la calidad de rodaje, no se registra; cualquier abultamiento significativo ocasionado por los rieles se incluye en la medición</i> ).

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 17**

### Cruce de vía férrea



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.15. Ahuellamiento

**Tabla 20**

### *Ahuellamiento (rutting)*

<b>Descripción</b>	Deformación longitudinal en forma de surcos o <b>huellas de rueda</b> hundidas en la calzada. Se manifiesta como depresiones en las trayectorias de las ruedas; a veces acompañadas de ligero levantamiento a los lados del surco, y frecuentemente visibles tras la lluvia al llenarse de agua. El ahuellamiento es producto de <b>deformación permanente</b> en las capas del pavimento o la subrasante por consolidación o desplazamiento lateral de materiales bajo cargas repetitivas. Un ahuellamiento pronunciado señala deterioro estructural significativo y puede comprometer la seguridad (acumulación de agua, control del vehículo).
<b>Severidad Baja</b>	Profundidad promedio de la huella de 6 a 13 mm. Ver Figura 18 (a)
<b>Severidad Media</b>	Profundidad > 13 mm hasta 25 mm. Ver Figura 18 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Profundidad > 25 mm. Ver Figura 18 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) presenta con ahuellamiento. ( <i>La severidad se determina por la profundidad promedio del surco, medida perpendicularmente a la huella.</i> )

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 18**

### *Ahuellamiento*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.16. Desplazamiento

**Tabla 21**

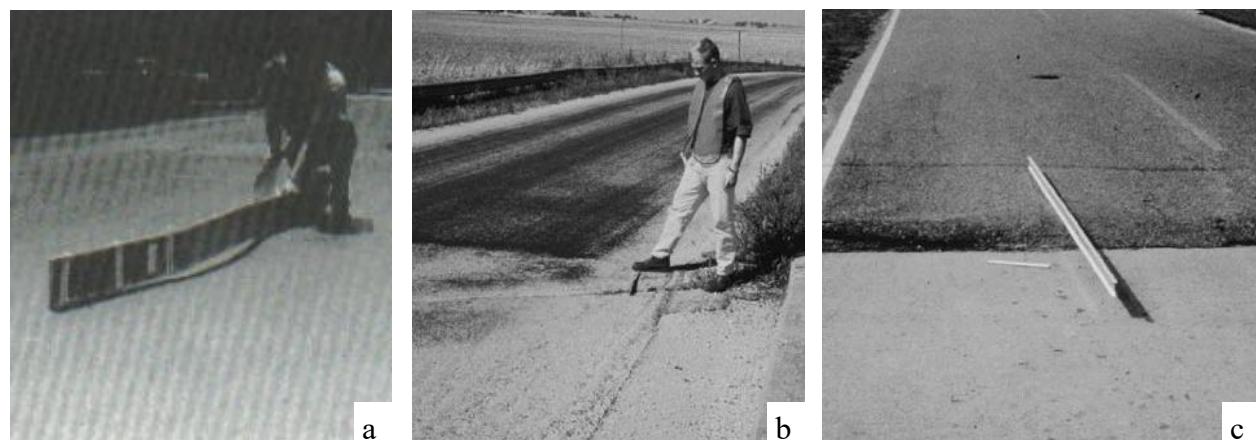
*Desplazamiento (shoving)*

<b>Descripción</b>	Deformación longitudinal permanente de una zona del pavimento, que se ha desplazado en la dirección del tránsito formando una “ola” corta y abrupta. Es típicamente causada por esfuerzos de frenado o arrastre de vehículos sobre mezclas asfálticas inestables (exceso de ligante blando). Cuando las llantas “empujan” el asfalto débil, este se mueve y genera abultamiento adelante de la zona de carga. También puede ocurrir en interfaces con pavimento rígido confinado: la expansión de losas de concreto contra el asfalto produce desplazamiento.
<b>Severidad Baja</b>	El corrimiento genera una irregularidad leve al rodar (onda muy baja; molestia de baja severidad). Ver Figura 19 (a)
<b>Severidad Media</b>	El desplazamiento provoca una onda más notable, ocasionando sacudidas de severidad media al pasar. Ver Figura 19 (b)
<b>Severidad Alta</b>	El desplazamiento forma una deformación abrupta que interfiere seriamente en la marcha (impacto de alta severidad, potencialmente peligroso). Ver Figura 19 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) desplazada. ( <i>Si el corrimiento ocurre sobre un parche, se clasifica como parte del parche y no por separado</i> ).

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 19**

*Desplazamiento*



Nota: Adaptado de *Pavement Managemet* por Shahin (2005)

## 2.2.9.17. Grietas parabólicas

**Tabla 22**

*Grietas parabólicas (slippage cracking)*

<b>Descripción</b>	Grietas con forma de media luna (arco parabólico) causadas por esfuerzos de frenado o arrastre que hacen deslizar la capa asfáltica superior. Ocurren cuando hay poca adherencia entre la capa de rodadura y la subyacente, o la mezcla asfáltica es de baja resistencia al corte. No están relacionadas con asentamientos del terreno, sino con falta de cohesión o peggadura interna del pavimento. Su presencia indica que la capa superficial se mueve bajo las ruedas por falta de unión adecuada (p.ej., ausencia de emulsión de liga entre capas).
<b>Severidad Baja</b>	Grieta en media luna con ancho promedio < 10 mm. ( <i>Generalmente única grieta marcada, sin mayor fracturación alrededor.</i> ) Ver Figura 20 (a)
<b>Severidad Media</b>	Una de las siguientes: <b>(a)</b> ancho promedio de la grieta 10–38 mm; <b>o (b)</b> el área alrededor de la grieta presenta fisuras pequeñas densas (fragmentada en pedacitos ajustados). Ver Figura 20 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Una de las siguientes: <b>(a)</b> ancho promedio de la grieta > 38 mm; <b>o (b)</b> el área alrededor de la grieta está fracturada en pedazos que se pueden desprender fácilmente (material suelto). Ver Figura 20 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) asociada a la grieta parabólica. ( <i>Si en un mismo “abanico” parabólico hay distintas severidades, se clasifica por la más alta presente en esa área.</i> )

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 20**

*Grietas parabólicas*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.18. Hinchamiento

**Tabla 23**

*Hinchamiento (swelling)*

<b>Descripción</b>	Abombamiento u ondulación larga de la superficie del pavimento, de longitud $> \sim 3$ m y gradiente suave. Es un levantamiento generalizado (pandeo hacia arriba) normalmente causado por la expansión de la subsastra (p. ej. suelos expansivos con humedad) o por congelamiento bajo el pavimento (formación de hielo que eleva el suelo). Puede venir acompañado de grietas superficiales por la deformación.
<b>Severidad Baja</b>	El hinchamiento produce una leve ondulación apenas perceptible visualmente; causa una sutil elevación al transitar a velocidad (molestia muy menor). Muchas veces el conductor solo lo nota como un “sube y baja” suave. Ver Figura 21 (a)
<b>Severidad Media</b>	El hinchamiento provoca una deformación apreciable que resulta en un vaivén de severidad media al pasar con el vehículo. Se advierte claramente la subida y bajada del vehículo. Ver Figura 21 (b)
<b>Severidad Alta</b>	El hinchamiento forma una onda pronunciada que afecta gravemente la calidad de rodadura (golpe o movimiento abrupto al cruzar, alta severidad). Ver Figura 21 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) abombada por hinchamiento.

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 21**

*Hinchamiento*



Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.9.19. Desprendimiento de Agregados

**Tabla 24**

*Meteorización / desprendimiento de agregados (weathering & raveling)*

<b>Descripción</b>	Deterioro superficial por pérdida del ligante asfáltico y desgaste o desprendimiento de los agregados en la capa superior. Indica que el asfalto se ha endurecido excesivamente (envejecimiento) o que la mezcla fue de pobre calidad, volviéndose vulnerable a la desintegración. También puede acelerarse por tráfico tipo orugas o por derrames de combustible/aceite que ablandan el asfalto y aflojan los agregados. Se manifiesta como una textura rugosa, árida, donde faltan partículas finas y se ven agregados sueltos.
<b>Severidad Baja</b>	Comienzo del desgaste: ligera pérdida de fino/ligante, con textura <i>algo</i> áspera pero todavía firme. Puede haber zonas levemente deprimidas o porosas. En caso de derrame de aceite, se observa la mancha, pero la superficie sigue dura (no se hunde al presionar con una moneda). Ver Figura 22 (a)
<b>Severidad Media</b>	Pérdida notable de agregado o ligante: la superficie está moderadamente rugosa y presenta <b>ahuecamiento</b> (pequeñas cavidades) evidente. Al tacto se siente porosa. Si hubo derrame de aceite, la superficie se siente algo blanda al presionar (la moneda puede marcar). Ver Figura 22 (b)
<b>Severidad Alta</b>	Desgaste severo: gran parte del agregado o asfalto perdido. La capa superficial es muy rugosa y <i>profundamente ahuecada</i> , con cavidades múltiples. (Cavidades >10 mm de diámetro o >13 mm de profundidad se considerarían <b>baches</b> incipientes). En caso de daño por aceite, el asfalto ha perdido totalmente adhesión y los agregados quedan sueltos. Ver Figura 22 (c)
<b>Unidad de medición</b>	Área ( $m^2$ ) con meteorización/desprendimiento

Nota: Adaptado de *Pavement Condition Index PCI*, por Vásquez Varela (2002)

**Figura 22**

*Desprendimiento de Agregados*

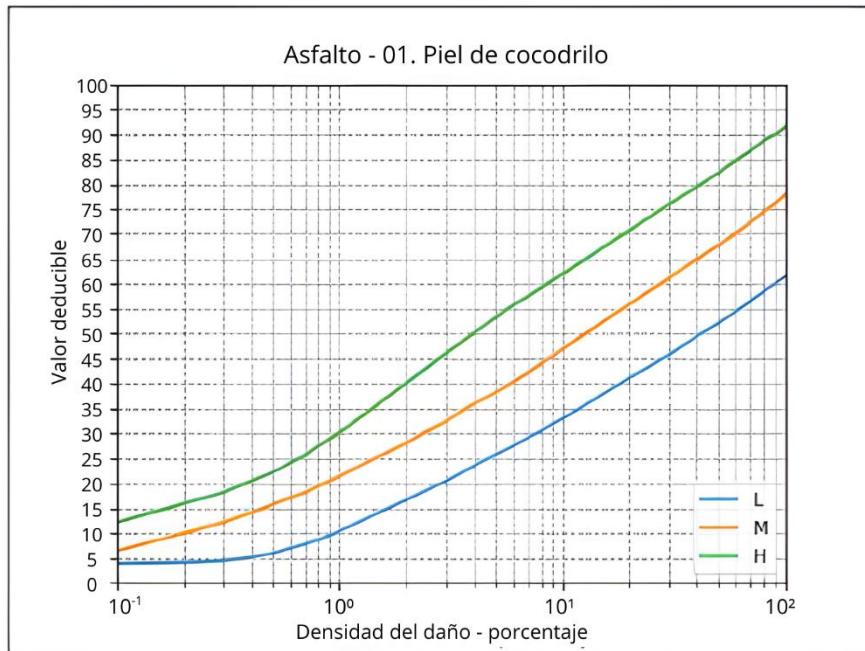


Nota: Adaptado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

## 2.2.10. Ábacos PCI – Pavimentos asfálticos

**Figura 23**

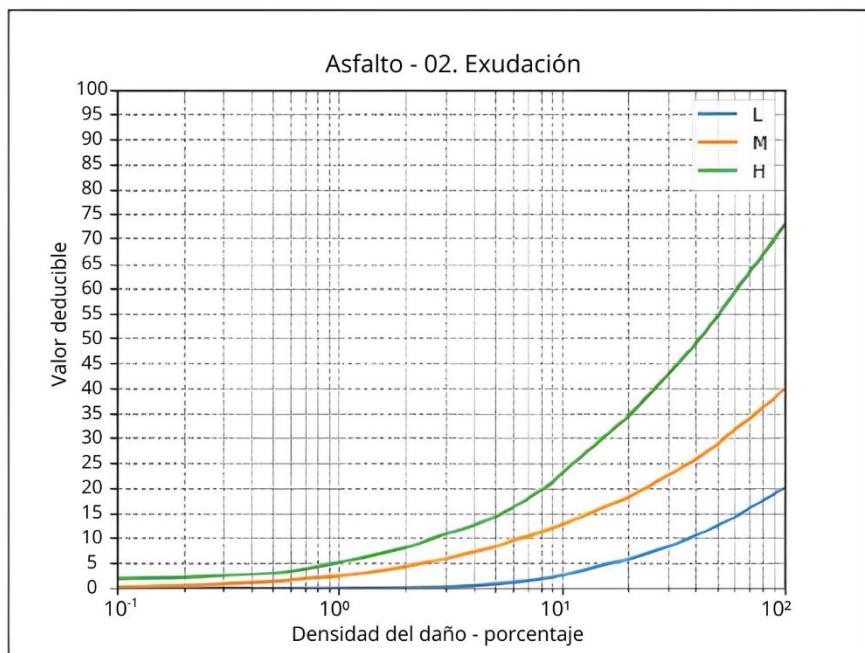
*Curvas de valor deducido – Piel de cocodrilo*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 24**

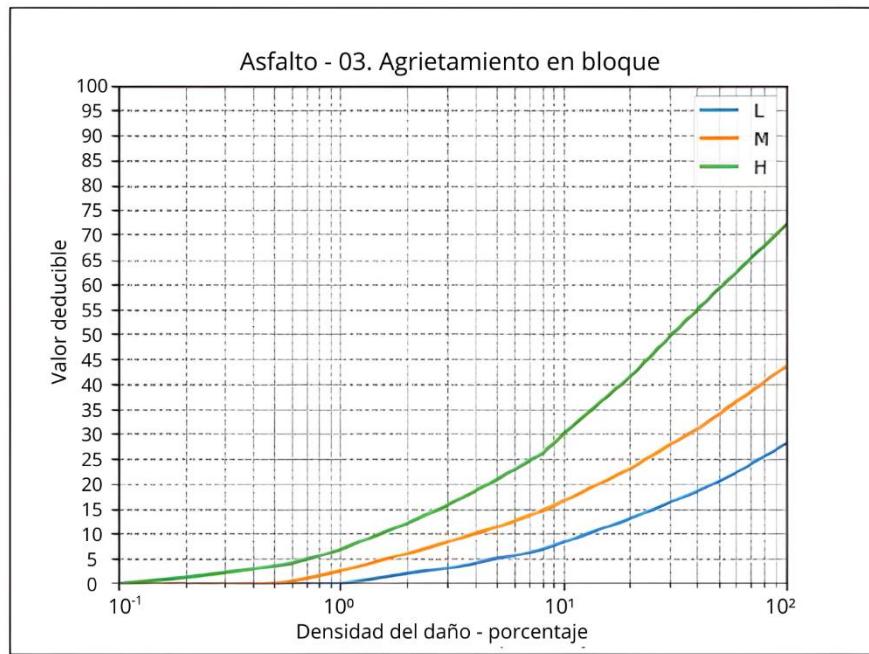
*Curvas de valor deducido - Exudación*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 25**

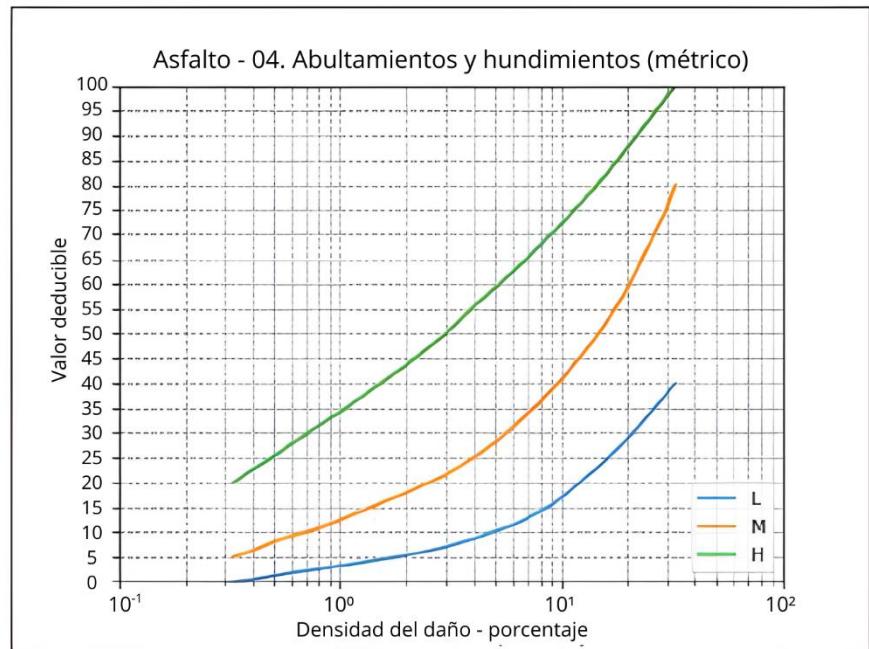
*Curvas de valor deducido – Agrietamiento en bloque*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 26**

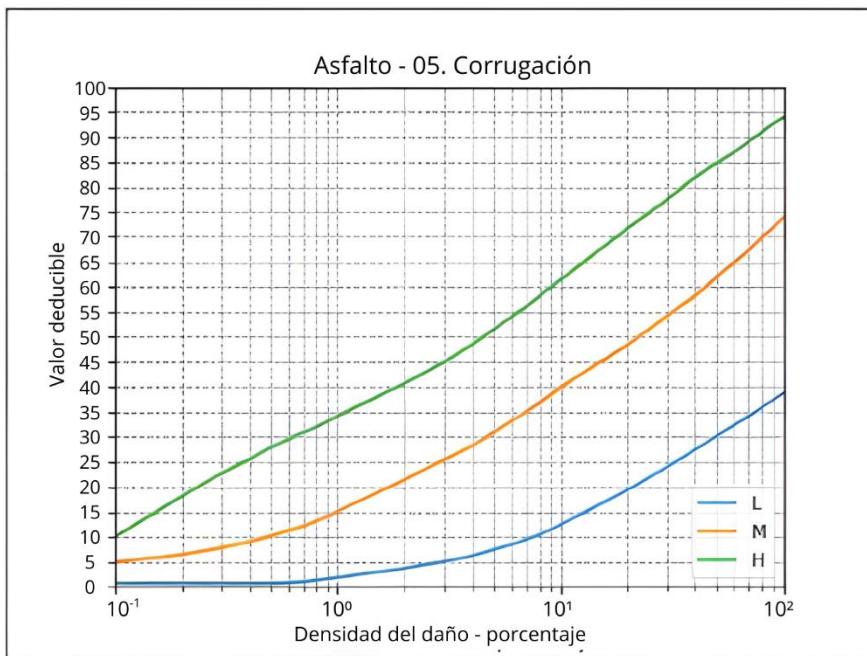
*Curvas de valor deducido - Abultamientos y hundimientos*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 27**

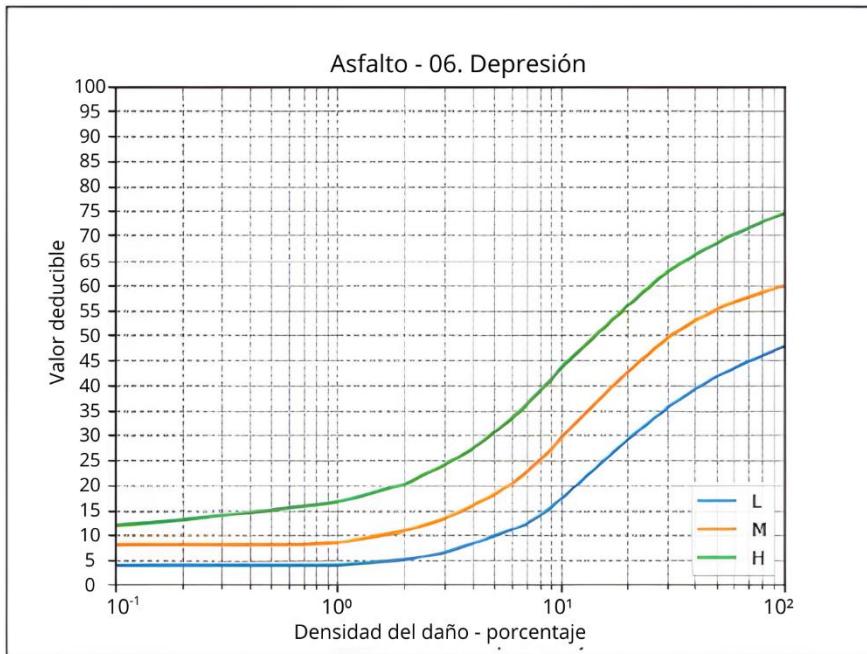
*Curvas de valor deducido – Corrugación*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 28**

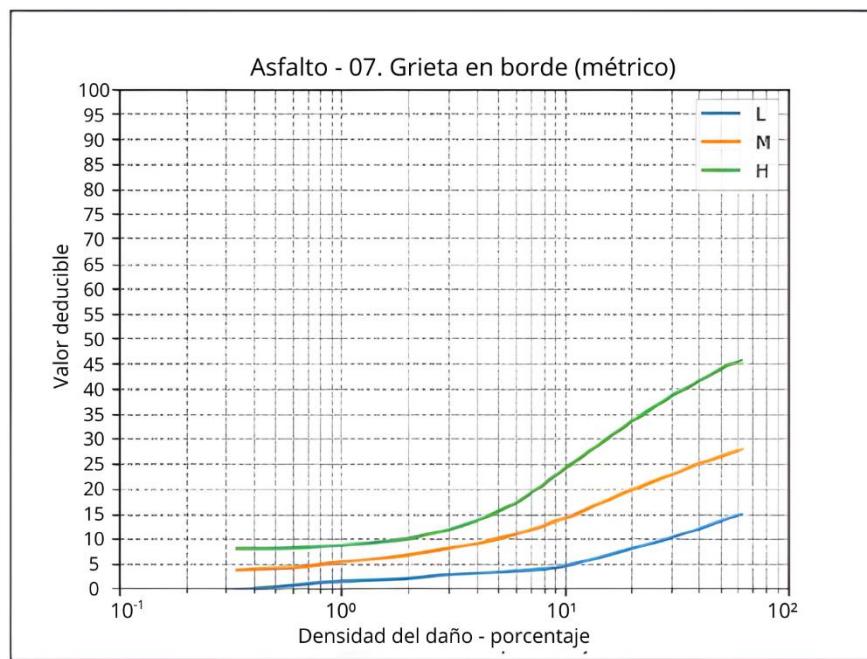
*Curvas de valor deducido – Depresión*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 29**

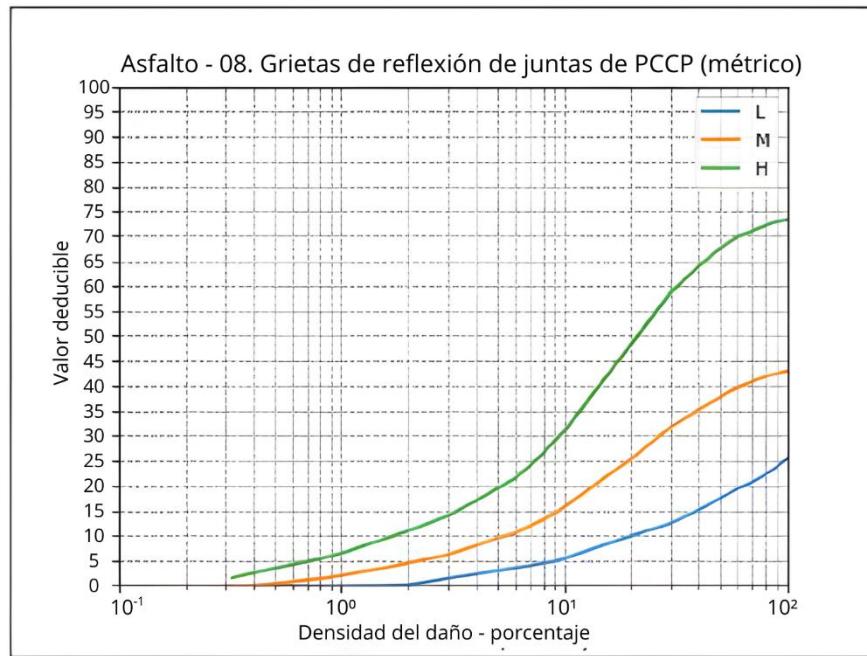
*Curvas de valor deducido – Grieta de borde*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 30**

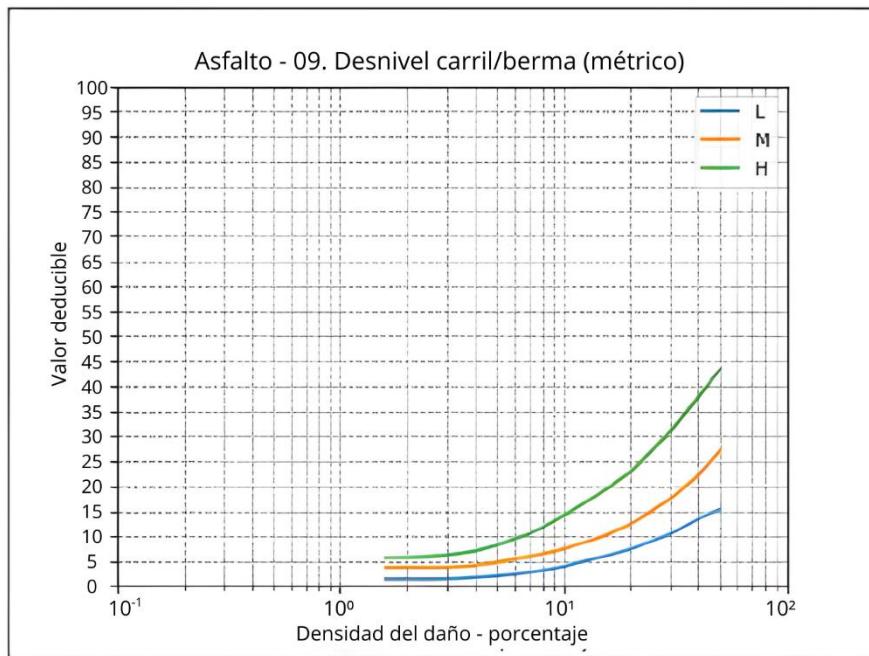
*Curvas de valor deducido – Grietas de reflexión de juntas*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 31**

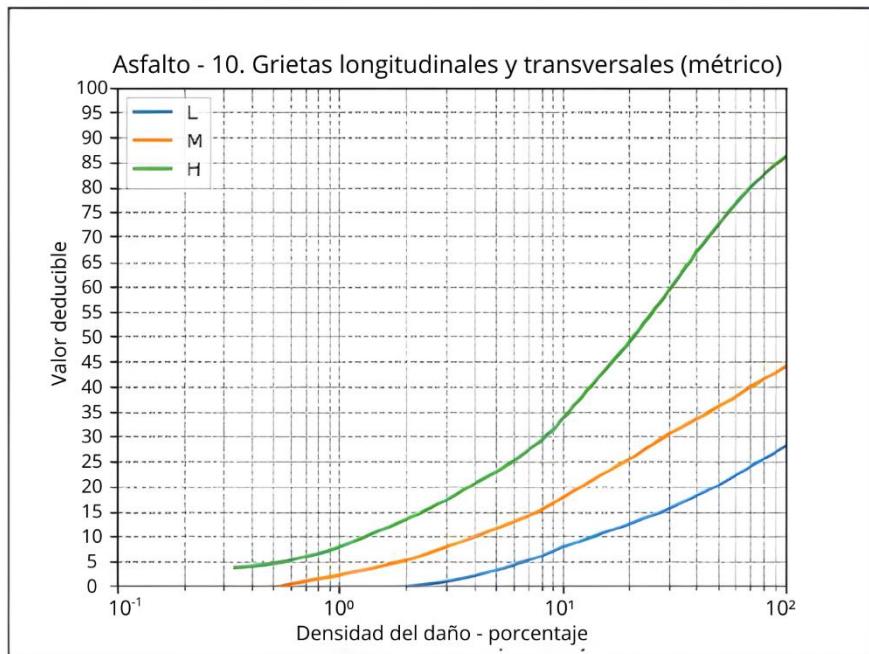
*Curvas de valor deducido – Desnivel carril / berma*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 32**

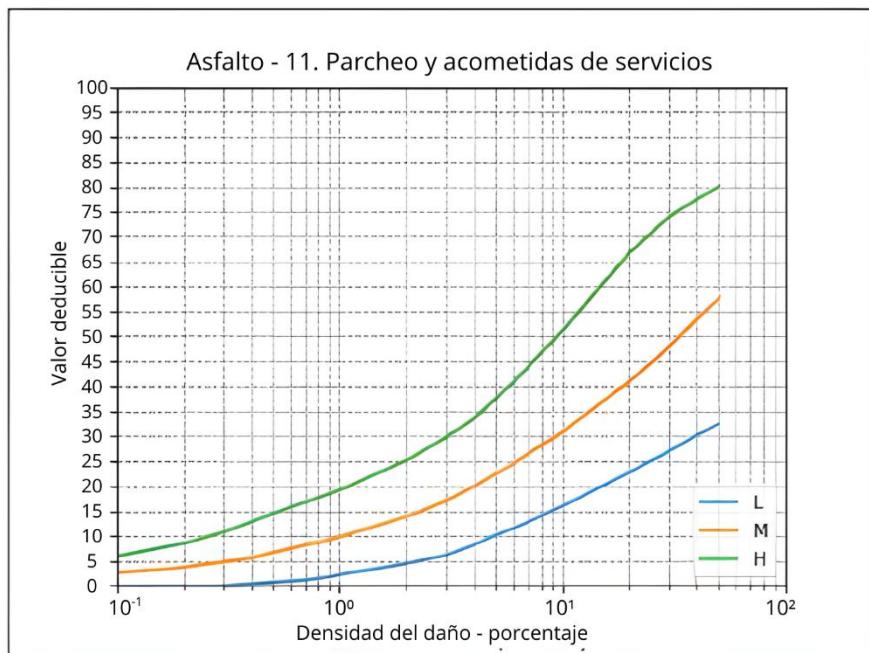
*Curvas de valor deducido – Grietas Longitudinales y Transversales*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 33**

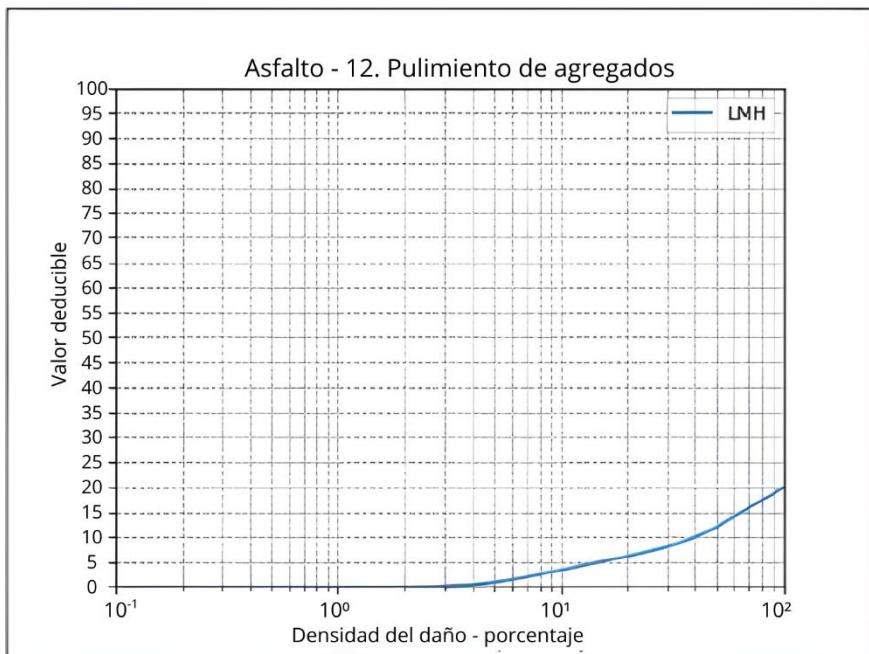
*Curvas de valor deducido – Parcheo y acometidas de servicios*



*Nota:* Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 34**

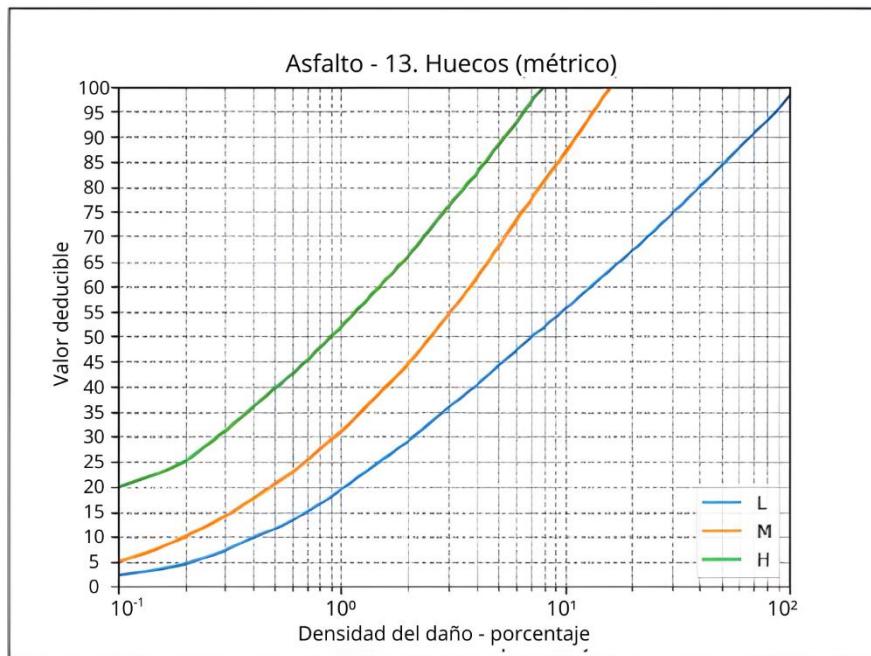
*Curvas de valor deducido – Pulimiento de agregados*



*Nota:* Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 35**

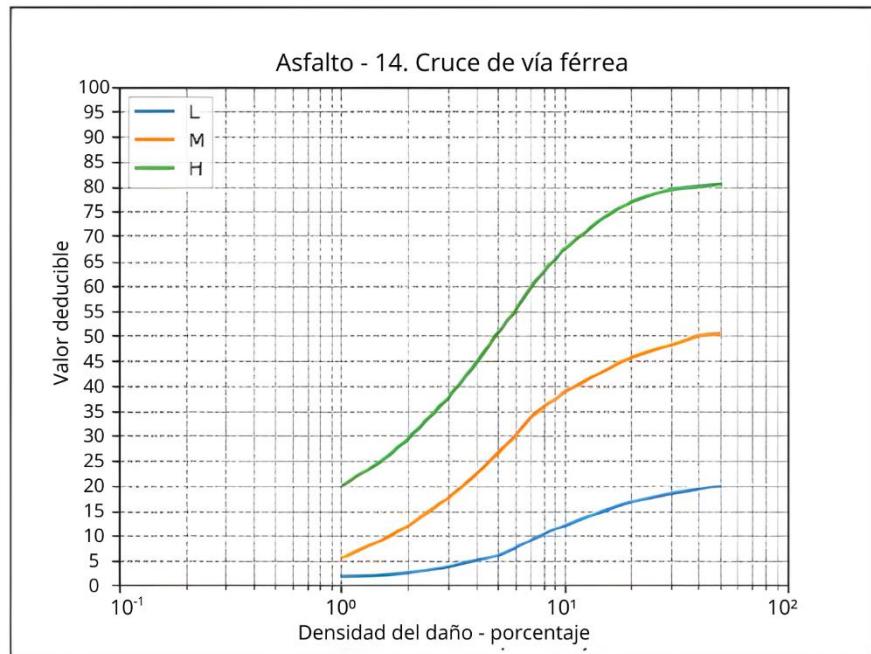
*Curvas de valor deducido – Huecos*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 36**

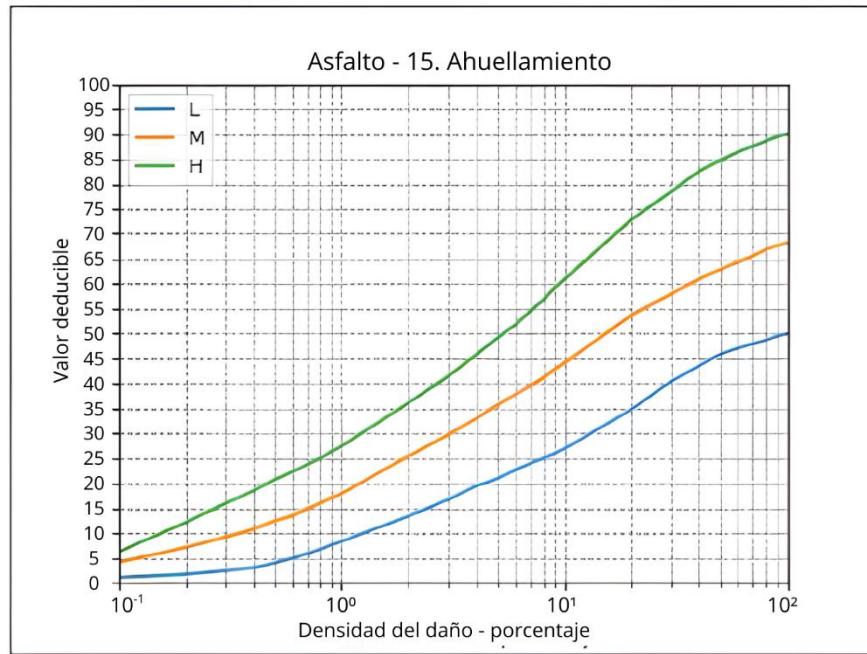
*Curvas de valor deducido – Cruce de vía férrea*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 37**

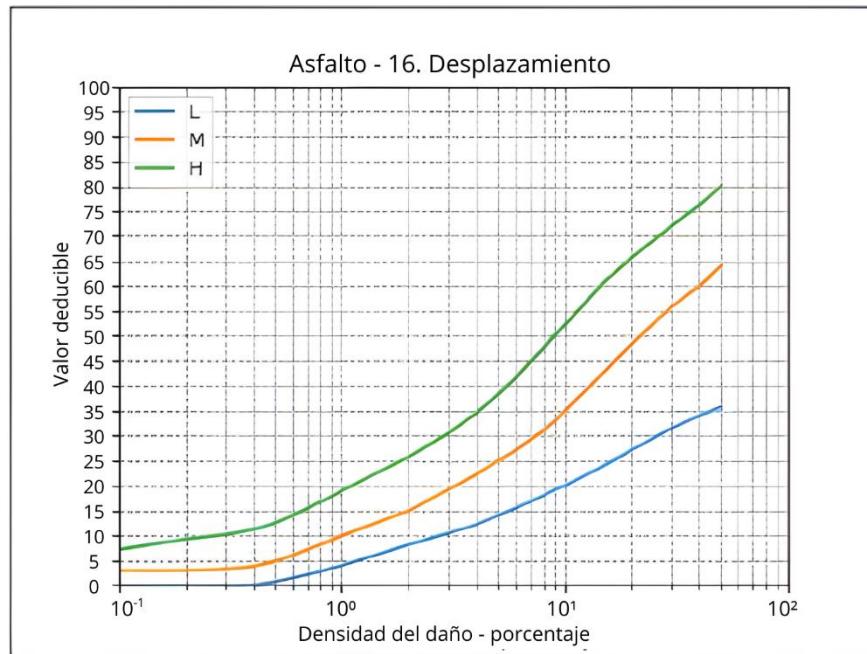
*Curvas de valor deducido – Ahuellamiento*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 38**

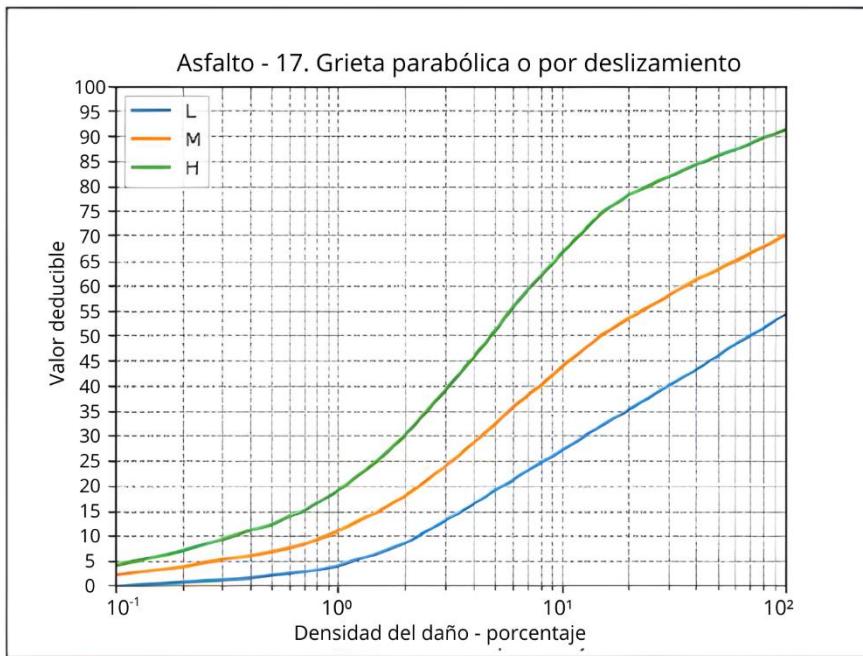
*Curvas de valor deducido – Desplazamiento*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 39**

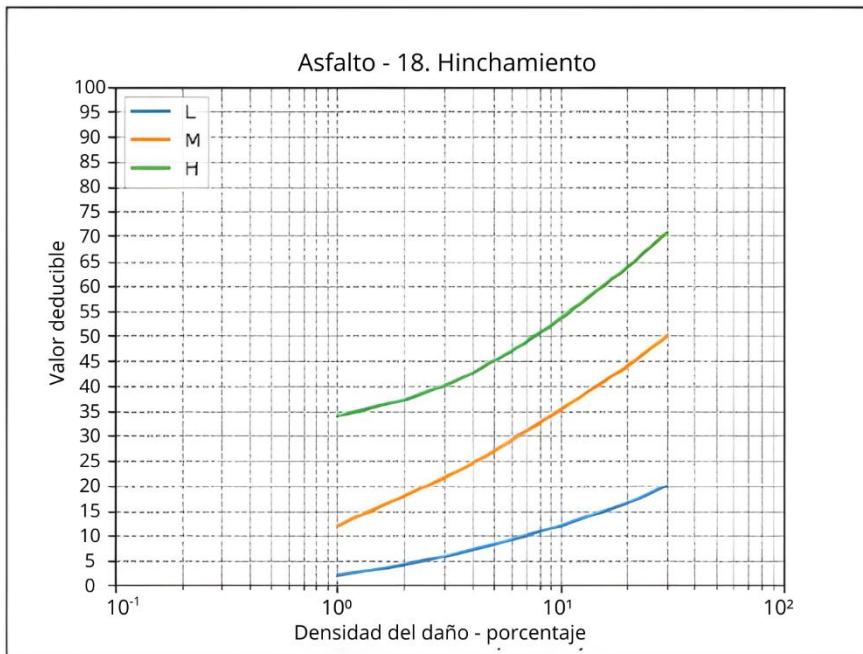
*Curvas de valor deducido – Grieta parabólica o por deslizamiento*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 40**

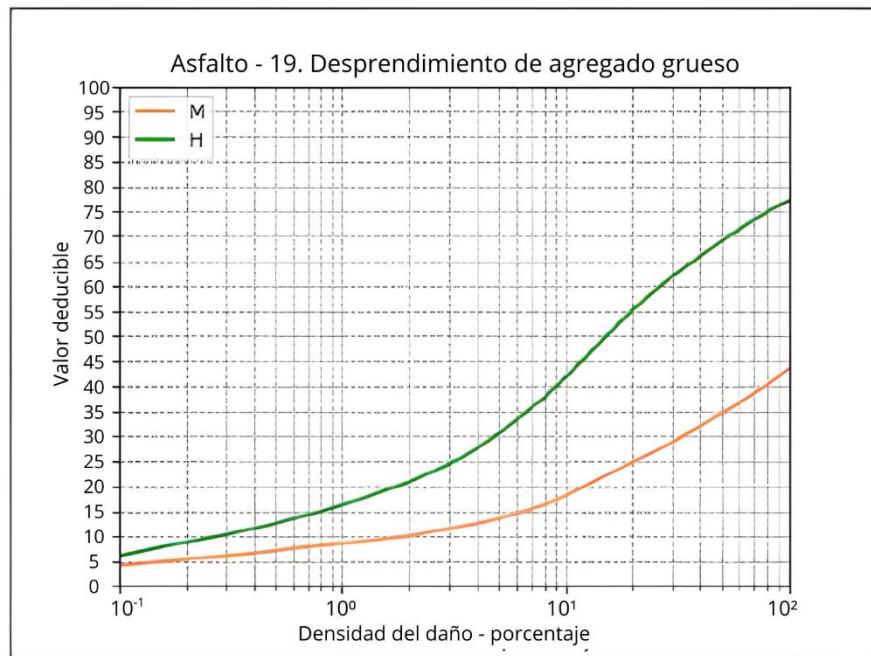
*Curvas de valor deducido – Hinchamiento*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 41**

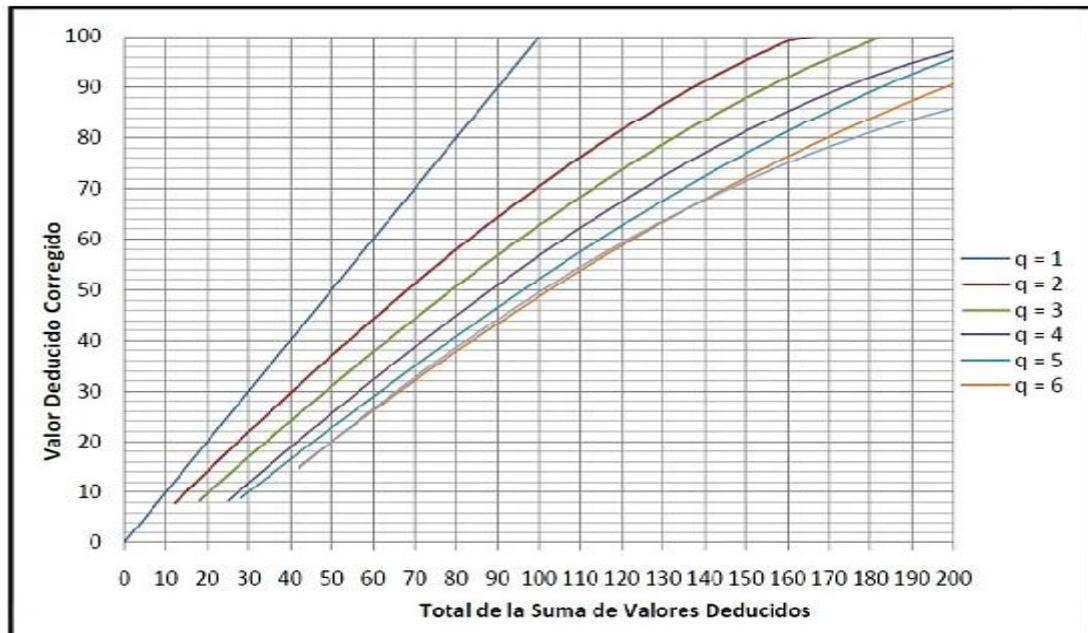
*Curvas de valor deducido – Desprendimiento de agregado grueso*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

**Figura 42**

*Curvas de valor deducido corregido (VDC)*



Nota: Tomado de *Manual de PCI y URCI* por Vásquez Varela (2024)

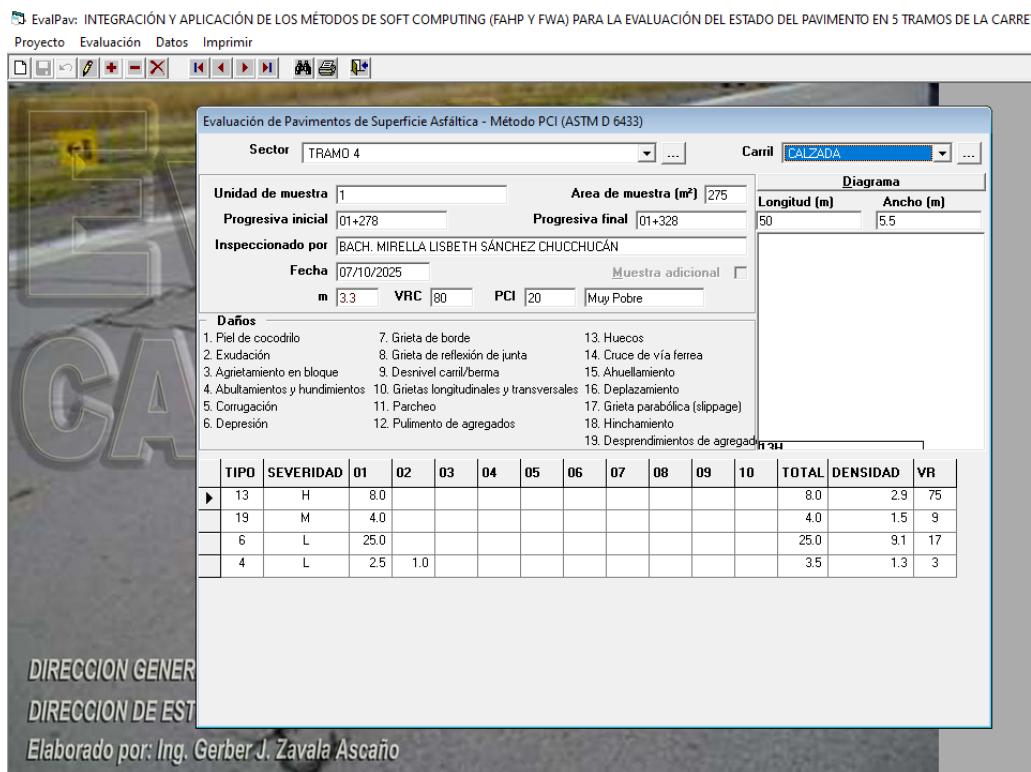
### **2.2.11. Software EvalPavCar**

EvalPavCar es un programa informático especializado que facilita la aplicación del método PCI para pavimentos flexibles o asfálticos. EvalPavCar para pavimentos de superficie asfáltica se basa en la norma internacional ASTM D6433

El software permite registrar, procesar y analizar los datos de deterioro superficial del pavimento, cuantificar fallas, severidades, áreas afectadas y finalmente calcular el PCI para cada unidad de muestra (Sanchez Bautista, 2022).

**Figura 43**

*Interfaz de Software EvalPavCar*



### **2.2.12. Índice Internacional de Rugosidad (IRI)**

El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es un parámetro estándar que cuantifica la regularidad superficial de un pavimento. Mide la acumulación de los desplazamientos verticales de la suspensión de un vehículo tipo (modelo “cuarto de carro”) al recorrer una vía a velocidad constante. (Steven M & Michael W, 2025)

Surgió como estándar internacional propuesto por el Banco Mundial en 1986 para unificar la medición de la rugosidad mediante cualquier equipo (perfilómetros o sistemas basados en la respuesta vehicular)

En la práctica, un IRI bajo indica un pavimento más uniforme (superficie lisa), mientras que valores altos reflejan mayor irregularidad (mayor incomodidad de rodadura).

#### **2.2.12.1. Escalas de IRI**

La escala de evaluación del pavimento según su rugosidad que el MTC establece es la siguiente:

**Tabla 25**

*Estado Vial según Rugosidad*

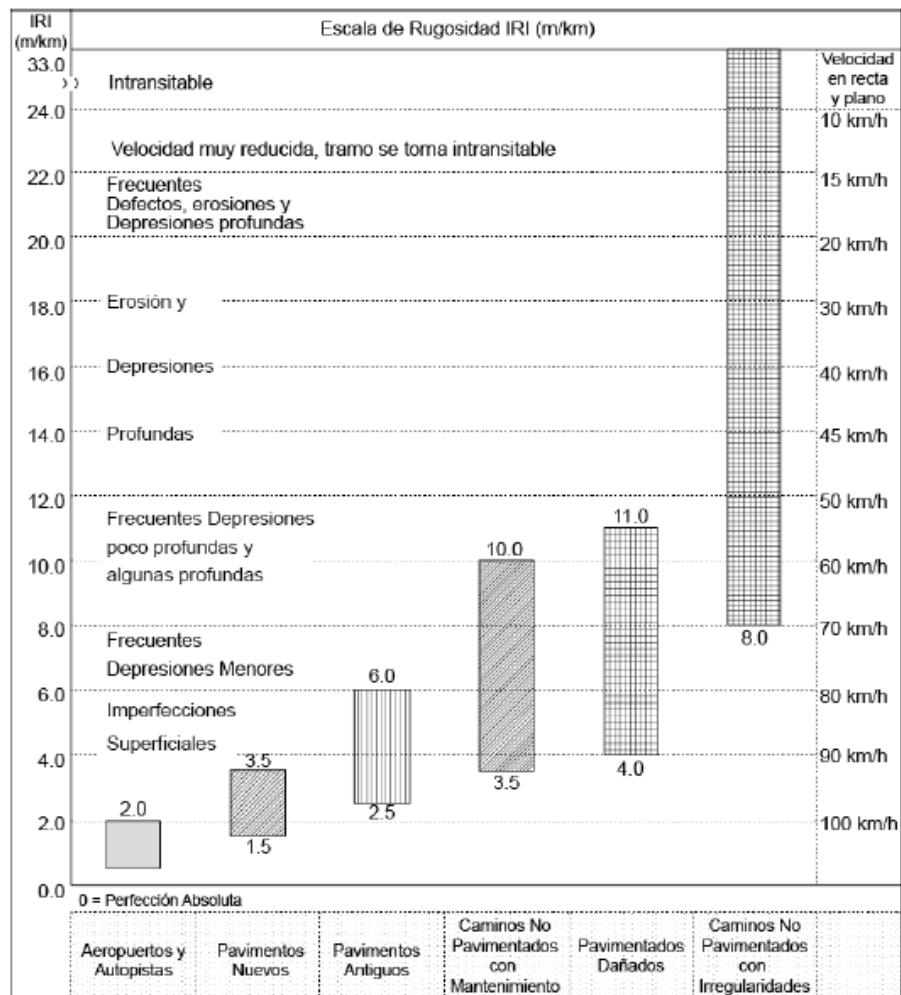
ESTADO	VÍAS PAVIMENTADAS	VÍAS NO PAVIMENTADAS
	RUGOSIDAD	RUGOSIDAD
BUENO	$0 < \text{IRI} \leq 2.8$	$\text{IRI} \leq 6$
REGULAR	$2.8 < \text{IRI} \leq 4.0$	$6 < \text{IRI} \leq 8$
MALO	$4.0 < \text{IRI} \leq 5.0$	$8 < \text{IRI} \leq 10$
MUY MALO	$5 < \text{IRI}$	$10 < \text{IRI}$

*Nota:* Adaptado de *Especificaciones Técnicas Generales para la conservación de Carreteras* por MTC (2007).

Según Sayers et al. (1986) establece una escala para los distintos tipos de pavimento y condición, tal como se muestra en la Figura 44.

**Figura 44**

*Escala de Rugosidad IRI (m/km)*



Nota: Adaptado de *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*  
 Sección: *Suelos y Pavimentos* por MTC (2014)

### 2.2.13. Roadroid

Roadroid es una aplicación móvil (para Android) que permite estimar el estado de la superficie de la carretera, específicamente la rugosidad, a través de los sensores incorporados en un teléfono inteligente (acelerómetro, GPS, cámara) y convertir esos datos en valores de IRI o estimados de IRI (Forslön & Jones, 2015).

El sistema Roadroid realiza un análisis del camino 100 veces por segundo (equivalente a una medición cada 25 cm cuando el vehículo circula a 90 km/h). A partir de estos datos, calcula el valor

del IRI y registra el estado de la carretera junto con sus coordenadas GPS correspondientes. La información se almacena inicialmente en el teléfono y luego se transfiere a la nube (Ramirez Castro, 2017).

#### **2.2.13.1. IRI estimado (eIRI)**

El IRI estimado (eIRI) es una adaptación del método propuesto por el Banco Mundial, basada en correlaciones lineales con equipos de alta precisión y clasificada como de precisión tipo 3 según Sayers.

Para su validación, se compararon mediciones de tramos de 20 m obtenidas con un perfilómetro láser y con el sistema Roadroid, obteniéndose un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.5, que indica una correlación moderada. Sin embargo, el método presenta limitaciones en pavimentos muy deteriorados y en vehículos pequeños, debido a su mayor sensibilidad (Sayers et al., 1986).

Actualmente, diversas instituciones continúan investigando mejoras al método. Entre ellas, la Universidad de Auckland reportó una correlación del 81 % entre los resultados del Roadroid y los de un perfilómetro de clase 1 (Ramirez Castro, 2017).

#### **2.2.13.2. IRI calculado (cIRI)**

Según investigaciones del equipo Roadroid, el IRI calculado (cIRI) ofrece mediciones confiables de la rugosidad vial cuando se calibra adecuadamente, y se clasifica en la clase 2 de precisión según el método de Sayers (1986). Este índice se fundamenta en el modelo del cuarto de carro del Banco Mundial y recomienda realizar las mediciones a velocidad constante entre 60 y 80 km/h.

La validación se efectuó mediante el software PROVAL, herramienta reconocida por la FHWA y el LTPP en Estados Unidos. Aunque el método presenta limitaciones en superficies muy irregulares como adoquines o pavimentos con sellado de grava, sin embargo ofrece excelentes resultados en pavimentos asfálticos (Ramirez Castro, 2017).

Las investigaciones continúan, pero hasta el momento el cIRI muestra mayor precisión que el eIRI.

El algoritmo que utiliza la aplicación toma la aceleración medida, la filtra para eliminar la gravedad y el ruido, y calcula el desplazamiento vertical acumulado de la suspensión simulada por unidad de distancia recorrida:

**Ecuación 17:** Ecuación del IRI

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L |Z_s - Z_u| dt$$

Donde:

L: Es la longitud del tramo evaluado.

dt: Es el diferencial de tiempo

Z<sub>s</sub>: Desplazamiento de la masa suspendida (chasis).

Z<sub>u</sub>: Desplazamiento de la masa no suspendida (eje/rueda).

Dado que la aplicación tomará datos dentro de un vehículo real y no en el "carro estándar" teórico, la vibración real es diferente. Para corregir esto matemáticamente, Roadroid aplica un Factor de Sensibilidad (S).

**Ecuación 18:** Corrección del IRI con Factos de Sensibilidad

$$cIRI_{final} = cIRI_{bruto} \times S$$

El algoritmo multiplica los resultados de la simulación por el factor seleccionado para ajustar la amortiguación del auto a la rugosidad real del asfalto.

### 2.2.13.3. Funcionamiento de Roadroid

El funcionamiento general de Roadroid para medir o estimar IRI según la Guía de Usuario de Roadroid se resume en los siguientes pasos y componentes:

- a) Se instala la aplicación Roadroid en un teléfono Android compatible y se calibra el dispositivo según las instrucciones del fabricante o desarrollador.

- b) La cámara, el acelerómetro y el GPS del teléfono quedan activos para registrar datos de vibración, posición y velocidad del vehículo.
- c) El vehículo equipado con el smartphone circula por el tramo de interés a una velocidad adecuada y el teléfono recoge en tiempo real los valores de aceleración vertical y/o vibración, junto con la posición GPS
- d) La aplicación procesa estos datos y calcula en el momento (o posteriormente) un valor de “eIRI” o valor estimado de IRI, usando algoritmos que transforman la vibración medida por los sensores en una estimación del desplazamiento vertical acumulado por unidad de distancia, como lo hace el IRI convencional.
- e) Una vez finalizado el tramo, los datos recogidos pueden subirse a la plataforma de datos de Roadroid o exportarse para análisis posterior.

#### **2.2.14. Resistencia al Deslizamiento**

La resistencia al deslizamiento de un pavimento, también llamada “adherencia” o “coeficiente de fricción de la carretera”, es la fuerza que se genera en el contacto entre el neumático de un vehículo y la superficie de rodadura, que se opone al deslizamiento o patinaje de la rueda cuando actúan fuerzas de frenado, aceleración o cambio de dirección (PIARC, 2023).

En el ámbito de la seguridad vial, una adecuada resistencia al deslizamiento es clave porque cuando esta baja, especialmente en condiciones de pavimento mojado, aumenta de forma significativa el riesgo de accidentes por patinaje y peligro para la circulación, sobre todo si no se reducen los niveles de velocidad (CONREVIAL, 2000).

La resistencia al deslizamiento del pavimento depende directamente de su textura superficial, la cual se compone de dos elementos fundamentales: la microtextura, asociada al mortero, que proporciona la adhesión necesaria para la fricción neumático–pavimento; y la macrotextura, originada por el acabado superficial, que genera los canales de drenaje que facilitan la evacuación del agua y

aseguran el contacto continuo de la llanta con la superficie. En consecuencia, una textura óptima del pavimento requiere una combinación equilibrada de ambos componentes (CONREVIAL, 2000).

### **2.2.15. *Ensayo Círculo de arena***

El ensayo del círculo de arena está diseñado para medir la profundidad media de la macrotextura (también conocida como MTD = Mean Texture Depth) de la superficie del pavimento. Por tanto, el ensayo consiste en extender sobre la superficie de un pavimento un volumen determinado de arena fina, distribuyéndola y enrasándola posteriormente mediante un dispositivo adecuado (CEDEX, 2023).

**Figura 45**

*Procedimiento de Ensayo de Círculo de Arena*



*Nota:* Tomado de *Círculo de Arena* por CEDEX (2023)

#### **2.2.15.1. Procedimiento de ensayo**

El procedimiento del Ensayo, de acuerdo con la norma ASTM E965, es el siguiente:

- a) Preparación del área: La superficie del pavimento debe estar limpia, seca y libre de partículas sueltas, humedad o contaminantes.
- b) Medición del volumen: Se llena el recipiente calibrado con el material granular, se enrased y se vierte todo su contenido en el centro del área de ensayo. El cálculo del volumen interno del cilindro se mide utilizando la ecuación:

**Ecuación 19: Volumen interno de cilindro**

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4}$$

Donde:

- V= Volumen interno del cilindro
  - d= diámetro interno del cilindro
  - H= altura del cilindro
- c) Formación del círculo: Con el disco plano, se esparce suavemente el material con movimientos circulares hasta que el material rellene las depresiones y quede nivelado con las crestas.
- d) Medición del diámetro: Se mide el diámetro del círculo en al menos cuatro direcciones perpendiculares y se calcula el promedio (D).
- e) Cálculo del MTD: Se aplica la ecuación indicada para obtener la profundidad media de textura (MTD).

**Ecuación 20: Profundidad de macrotextura**

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Donde:

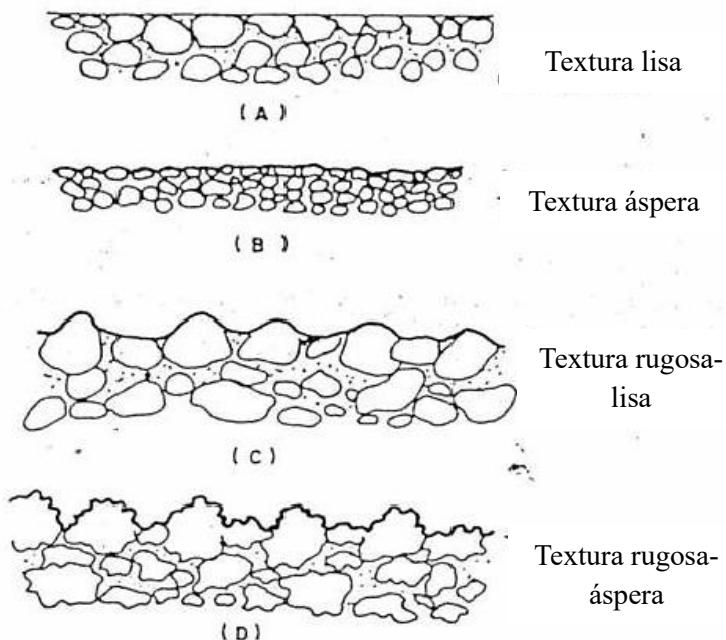
- MTD= Promedio de la profundidad de la macrotextura del pavimento
  - V= Volumen de la muestra
  - D= Diámetro promedio del área cubierta por el material
- f) Repetición: El ensayo debe realizarse al menos en tres puntos representativos de la superficie, promediando los resultados.

### **2.2.16. Inspección visual para cálculo de fricción**

Si bien existen equipos que pueden determinar un factor de fricción, se puede incorporar también una consideración indirecta a través de las fallas observadas en la superficie del pavimento (CONREVIAL, 2000). Utilizando esta técnica se pueden priorizar pruebas en puntos críticos, tales como: curvas, entradas, desvíos, etc.

**Figura 46**

*La textura del pavimento en relación con la resistencia al deslizamiento*



*Nota: Adaptado de Evaluación Y Diseño Preliminar Para Rehabilitación De Pavimentos Bituminosos por CONREVIAL (2000)*

### **2.2.17. Evaluación del estado de la superficie del pavimento**

De acuerdo con el CONREVIAL (2000), la evaluación del estado superficial del pavimento considera tres aspectos principales:

- Fallas superficiales:** identificación de los tipos de deterioro, su severidad y extensión.
- Serviciabilidad:** análisis del confort y la facilidad de tránsito para los usuarios.
- Seguridad:** valoración de las condiciones de adherencia y riesgo de deslizamiento.

Aunque estos tres aspectos tienen objetivos distintos, están estrechamente relacionados. El deterioro físico afecta la serviciabilidad (comodidad y costos de operación), pero medir las fallas no equivale directamente a medir la percepción del usuario.

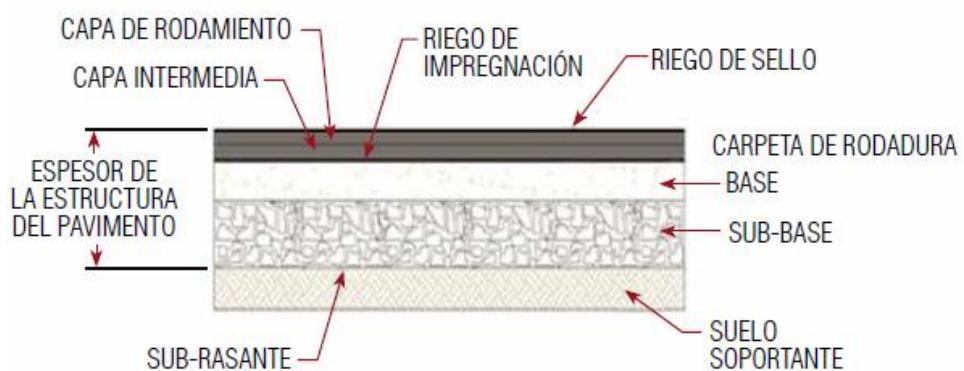
En conjunto, la evaluación busca recomendar medidas de mantenimiento o rehabilitación, y cuando se realiza de manera periódica, permite obtener información más amplia y útil para la gestión integral del pavimento.

### **2.2.18. Pavimento flexible**

Es una estructura formada por distintas capas de materiales granulares (como la subbase y la base), sobre las cuales se coloca una capa de rodadura compuesta por materiales bituminosos que actúan como aglomerantes, junto con agregados y, si es necesario, aditivos. Generalmente, la capa de rodadura asfáltica se aplica sobre las capas granulares en forma de mortero asfáltico, tratamiento superficial bicapa, micropavimentos, macadam asfáltico, mezclas asfálticas en frío o mezclas asfálticas en caliente (MEF, 2015).

**Figura 47**

*Estructura de pavimento Flexible*

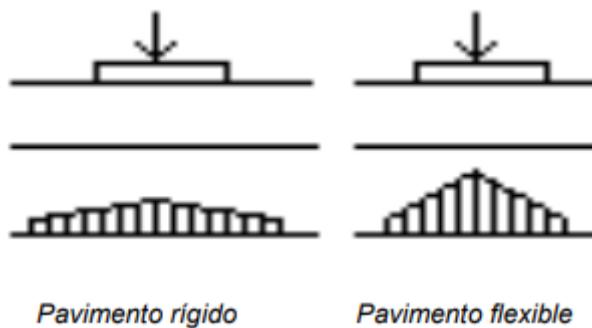


*Nota:* Tomado de, *Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras* por MEF (2015).

La diferencia fundamental entre los pavimentos flexibles y los rígidos según Llosa Grau (2006) radica en la manera en que distribuyen las cargas. En términos de diseño, los pavimentos flexibles se componen de varias capas, y la forma en que se disipan las cargas depende de las propiedades de cada una.

**Figura 48**

*Distribuciones de carga de pavimentos*



*Nota: Adaptado de, Propuesta alternativa para la distribución racional del presupuesto anual municipal para el mantenimiento y rehabilitación de pavimentos por Llosa Grau (2006).*

### **2.2.19. Clasificación de fallas en pavimentos flexibles**

#### **2.2.19.1. Fallas según su origen:**

- a) **Fallas por insuficiencia estructural:** Se trata de pavimentos construidos con materiales inapropiados en cuanto a resistencia o con materiales de buena calidad, pero en espesor insuficiente.
- b) **Fallas por defectos constructivos:** Se trata de pavimentos que quizá estuvieron formados por materiales suficientemente resistentes, pero en cuya construcción se han producido errores o defectos que afectan el comportamiento conjunto.
- c) **Fallas por fatigas:** Se trata de pavimentos que originalmente estuvieron en condiciones apropiadas, pero que por la continua repetición de las cargas del tránsito sufrieron efectos de fatiga.

#### **2.2.19.2. Fallas según la condición del pavimento:**

- d) **Falla estructural:** Es una deficiencia en el pavimento que provoca, de manera inmediata o progresiva, una disminución en su capacidad portante. En su fase más crítica, esta falla estructural se evidencia a través de un colapso generalizado del pavimento, situación que se vincula directamente con el índice de servicio.
- e) **Falla superficial o funcional:** La falla funcional consiste en las deficiencias superficiales del pavimento a las que se asocia el Índice de servicio, que afecta en mayor o menor grado la comodidad y seguridad que proporciona el camino al usuario. Si una falla funcional no se atiende a tiempo, puede conllevar a una falla estructural.

#### **2.2.20. Mantenimiento vial**

De acuerdo con el MTC (2016a) el mantenimiento o conservación vial es un proceso continuo y permanente que comprende un conjunto de actividades destinadas a mantener la operatividad, seguridad y nivel de servicio programado de una red vial. Se ejecuta mediante una asignación presupuestal anual, clasificada como gasto corriente en el sector público, que cubre recursos económicos, personal capacitado, maquinaria y herramientas. Su programación es técnica y previsora, pudiendo realizarse por administración directa o mediante contratos con terceros.

Este proceso se divide en dos categorías principales:

- a) **Conservación Rutinaria:** Conjunto de actividades preventivas y correctivas menores realizadas anualmente. Su objetivo es garantizar la seguridad inmediata, prevenir el avance de deterioros y mantener todos los componentes de la infraestructura (pistas, puentes, drenajes, señalización, taludes). No requieren estudios de preinversión, pero sí de un sistema de reconocimiento y reporte sistemático (incluso diario) para una atención oportuna. Acciones como la eliminación de baches, limpieza de drenajes y señalización de riesgos son cruciales para prevenir accidentes.

**b) Conservación Periódica:** Intervenciones planificadas a mediano plazo (más de un año) para recuperar las condiciones de la plataforma vial, como calzadas y bermas. Incluye técnicas como sellos, micropavimentos o refuerzos que pueden extender la vida útil del pavimento. Estas actividades deben mantener el trazado existente y estar coordinadas con la conservación rutinaria.

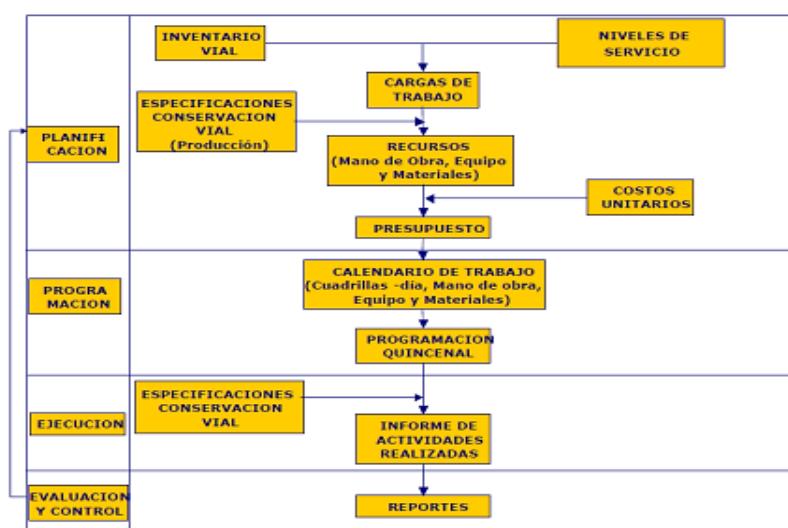
En esencia, la conservación vial es una inversión estratégica que, mediante una programación técnica sistemática, busca optimizar recursos, garantizar la seguridad de los usuarios y prolongar la vida útil de la infraestructura, evitando así costosas rehabilitaciones futuras.

#### **2.2.21. Gestión del mantenimiento vial**

La gestión de la conservación vial implica la integración y coordinación de diversas actividades estratégicas, que incluyen la formulación de políticas, la planificación, organización, financiamiento, ejecución, supervisión y operación. El objetivo primordial de este proceso es garantizar una conservación efectiva de la infraestructura vial, que permita optimizar los recursos, asegurar la fluidez del tránsito, y proporcionar condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las vías (MTC, 2016a).

**Figura 49**

*Proceso de Gestión y Administración de la conservación vial*



Nota: Tomado de. *Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial* por MTC (2016a).

### **2.2.22. Evaluación Superficial de pavimentos:**

De acuerdo con Llosa Grau (2006) para analizar la condición superficial de los pavimentos, se emplean diversos métodos, entre los más utilizados se encuentran:

- El sistema desarrollado por la Universidad de Wisconsin (PASER)
- El método del Consorcio de Rehabilitación Vial (CONREVIAL)
- El Índice de Condición del Pavimento (PCI)
- Método de Inspección Visual de Daños en carreteras (VIZIR)

Estos métodos son de aplicación sencilla y no requieren equipos complejos ni personal altamente especializado. La inspección se realiza en dos etapas:

- a) **Inspección Preliminar.** Realizada desde un vehículo en movimiento para obtener una visión general del estado de la vía.
- b) **Inspección detallada.** Realizada a pie para registrar de forma precisa el tipo, gravedad, frecuencia y ubicación de los deterioros.

La información obtenida permite documentar defectos y sustentar estrategias de rehabilitación. Adicionalmente, existen modelos de evaluación difusa, que complementan estos métodos incorporando el análisis de incertidumbre y subjetividad en la valoración de daños.

### **2.2.23. Levantamiento topográfico**

Un levantamiento topográfico es un conjunto de procedimientos y técnicas de medición que se realizan para determinar la posición relativa, tanto planimétrica (X, Y) como altimétrica (Z), de los puntos y detalles físicos presentes en un área específica de la superficie terrestre, con el fin de representarla gráficamente a través de planos, mapas o modelos digitales.

### 2.3. Definición de términos básicos

- **Fallas de pavimento:** Deficiencia o deterioro en la superficie de rodadura, base, sub-base o subrasante de un pavimento, que afecta adversamente su funcionalidad, seguridad o vida útil (MTC, 2016b)
- **FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process):** Es una extensión del método Analytic Hierarchy Process (AHP) que incorpora la lógica difusa. Permite jerarquizar criterios y subcriterios de decisión mediante comparaciones pareadas y valores difusos, reduciendo la subjetividad del juicio experto y otorgando mayor flexibilidad en contextos con incertidumbre (Saaty, 1990)
- **FWA (Fuzzy Weighted Average):** Es un método de Soft Computing que utiliza números difusos y ponderaciones lingüísticas para evaluar alternativas o indicadores. En la evaluación de pavimentos, permite calcular valores de condición integrando la incertidumbre en la medición y el juicio experto, a través de un promedio ponderado difuso (Dong & Wong, 1987).
- **PCI:** El Índice de Condición del Pavimento es un índice numérico que evalúa el estado superficial de un pavimento (Vásquez Varela, 2002).
- **IRI:** El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es un parámetro estándar que cuantifica la regularidad superficial de un pavimento (Steven M & Michael W, 2025).
- **MTD:** La Profundidad Media de Textura (MTD) es el parámetro geométrico utilizado para cuantificar la macrotextura de la superficie del pavimento. Representa la profundidad promedio de los vacíos o huecos existentes en la capa de rodadura (ASTM E965, 2006)

### 3. CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Periodo

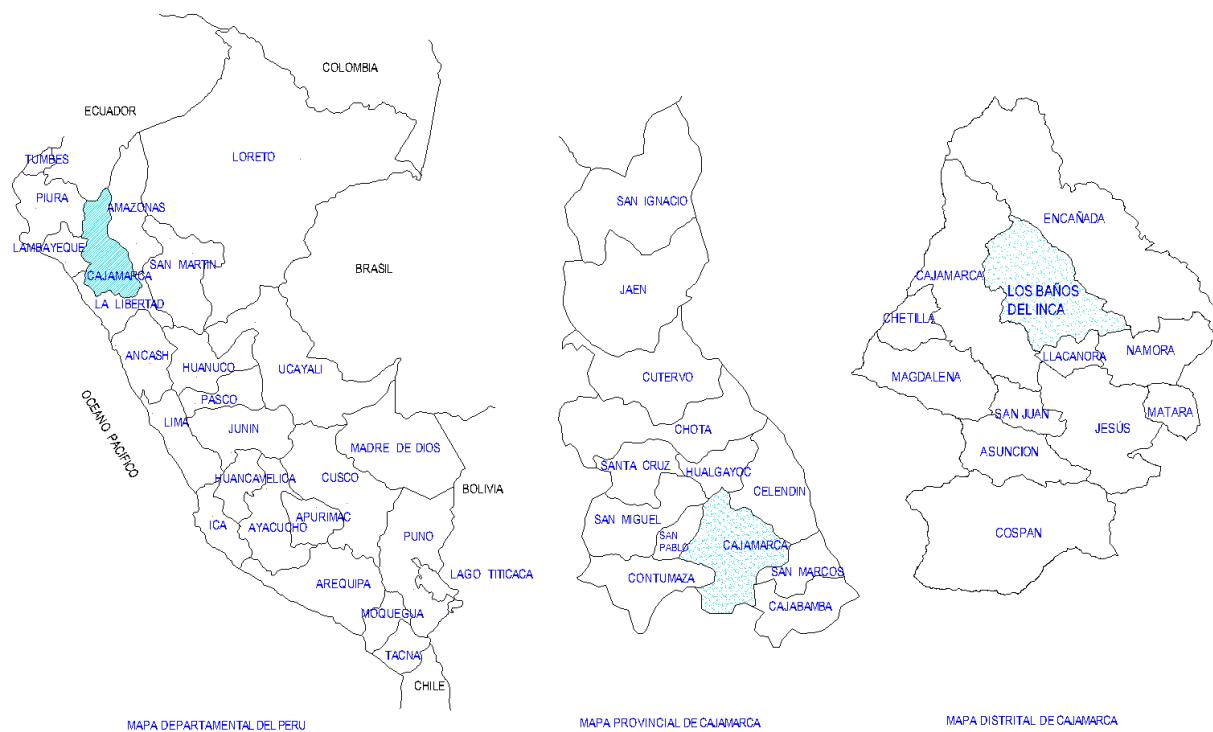
El presente estudio de investigación se llevó a cabo en el periodo de junio - setiembre del 2025

#### 3.2. Ubicación

##### 3.2.1. *Ubicación política*

- País : Perú
- Región : Cajamarca
- Departamento: Cajamarca
- Provincia : Cajamarca
- Distrito : Los Baños del Inca
- Localidad : Tartar Chico

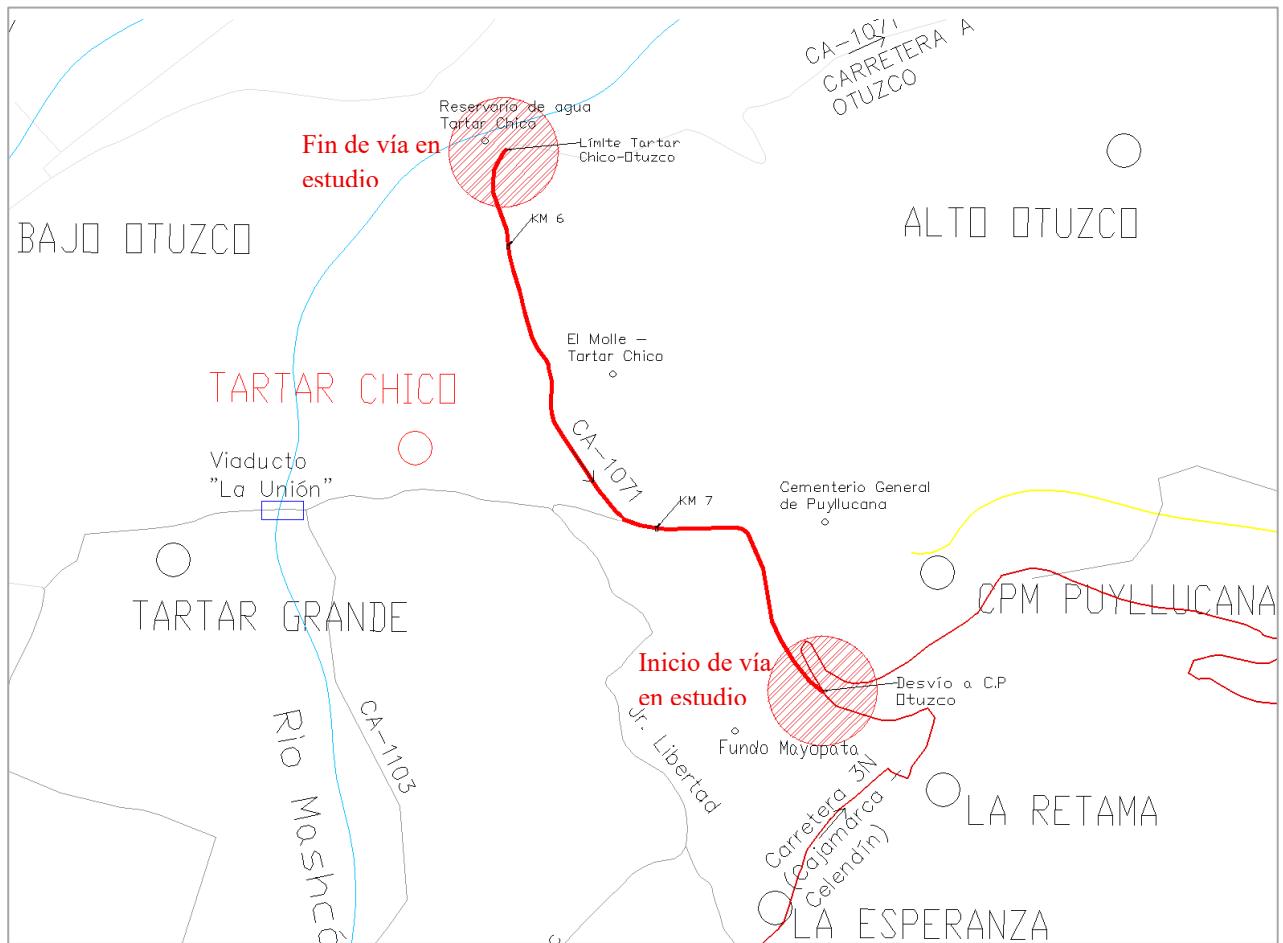
**Figura 50**  
*Macro localización*



Nota: Tomado de MDBI, Subgerencia de Estudios y Proyectos (2024)

**Figura 51**

*Micro localización*



### 3.2.2. Ubicación Geográfica

**Tabla 26**

*Coordenadas de la carretera en estudio*

COORDENADAS UTM WGS 84- CARRETERA EN ESTUDIO				
PUNTO	ESTE	NORTE	ALTITUD	ZONA
INICIAL	780963.96 m	9208798.08 m	2740 m.s.n.m	17 M
FINAL	780048.66 m	9210411.77 m	2722 m.s.n.m	17 M

### 3.3. Metodología de la Investigación

#### 3.3.1. Tipo, nivel y diseño de aplicación

La investigación realizada fue de tipo aplicada y se fundamenta en las metodologías FAHP y FWA. Nivel Descriptivo que describió los datos de inspección visual que se recolecten en campo, los

procedimientos de evaluación y sus resultados. De Diseño No experimental – Transeccional, dado que se recolectaron los datos en un solo momento, en un tiempo único.

### ***3.3.2. Población***

La población en estudio fue la Carretera CA-1071 del Centro Poblado de Tartar Chico

### ***3.3.3. Muestra***

La muestra está constituida por los cinco (05) tramos de la carretera CA-1071 seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia. Para dicha selección se aplicaron rigurosamente los siguientes criterios:

#### **Criterios de Inclusión:**

- Se seleccionaron tramos que presentan una longitud homogénea y constante de 426 metros cada uno. Esto se realizó para estandarizar la recolección de datos y permitir una comparación equitativa de los indicadores (IRI, PCI, MTD) entre las distintas secciones evaluadas.
- Tramos que cuentan con la misma sección transversal (ancho de calzada de 5.50 m) y características de pavimento flexible.

#### **Criterios de Exclusión:**

- Se excluyeron aquellos segmentos de la vía que se encuentran fuera de la jurisdicción del Centro Poblado de Tartar Chico.

### ***3.3.4. Unidad de Análisis.***

Cada tramo de la carretera CA-1071 (T1, T2, T3, T4, T5)

### ***3.3.5. Unidad de observación***

PCI, IRI y Resistencia al deslizamiento de las secciones de muestreo dentro de cada tramo

### **3.3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La técnica utilizada para la identificación de fallas en el pavimento flexible fue la evaluación visual y la cuantificación de fallas superficiales, los instrumentos de recolección de datos que se utilizaron fueron: Fichas técnicas, formatos de campo, listas de cotejo. El equipo que se utilizó fueron winchas, reglas, niveles y cinta métrica.

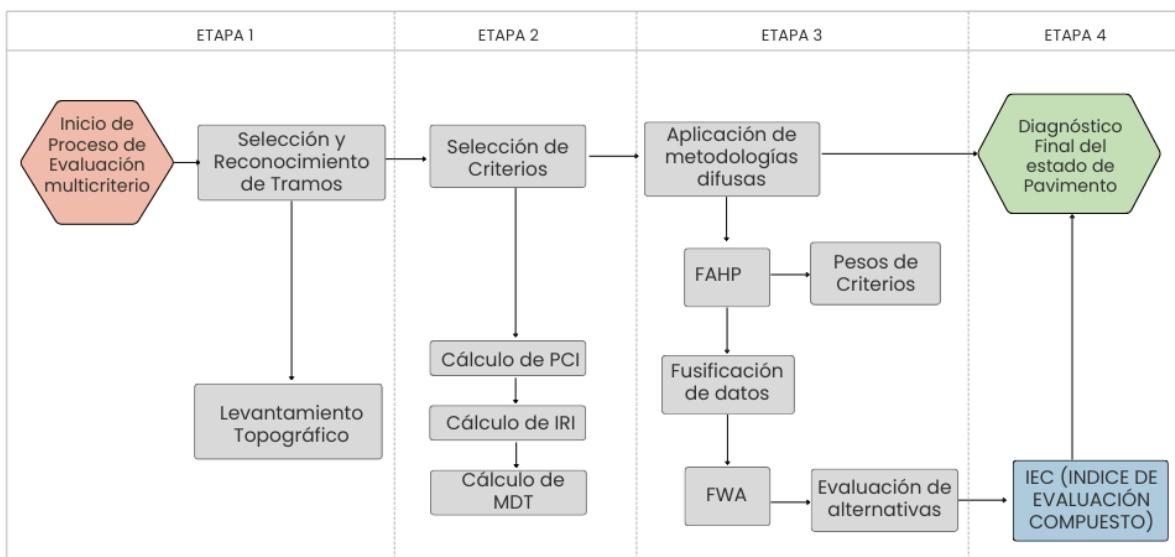
Para la obtención de las ponderaciones de parámetros se empleó la técnica de juicio de expertos, y como instrumento correspondiente se empleó un cuestionario de comparación pareada.

## **3.4. Procedimiento**

La presente investigación siguió un proceso sistemático dividido en 4 etapas principales, las cuales se detallan en el siguiente la Figura 52.

**Figura 52**

*Diagrama de flujo para la priorización de los tramos.*



### **3.4.1. Definición y Delimitación de Tramos de Estudio**

Se realizó una visita a la carretera CA-1071 desde el tramo inicial hasta el final, donde se hizo una inspección general de las fallas que presentaba. También se fijaron los puntos de inicio y final para cada uno de los 5 tramos a estudiar, se realizaron tomas fotográficas generales de cada tramo.

Estos tramos fueron seleccionados debido a su relevancia para la población del centro poblado, pero que se encuentran olvidados por las autoridades encargadas de darle su mantenimiento.

Esta carretera pertenece a una red vial vecinal, y es de bajo a mediano tránsito por lo que resultó ideal para este estudio, además es una carretera que se construyó hace más de 7 años y a la que no se ha brindado un mantenimiento adecuado hasta la fecha

### ***3.4.2. Levantamiento Topográfico.***

El levantamiento topográfico se realizó el día 05 de Julio del 2025. Se inició en la intersección con la carretera Nacional 3N, Carretera Celendín, en dirección hacia Otuzco con la finalidad de obtener la representación gráfica y geométrica de la vía en estudio, definiendo su planimetría y altimetría. Este proceso permitió generar el Modelo Digital del Terreno y establecer el estacado necesario para la ubicación precisa de las unidades de muestra para la evaluación del PCI y los tramos de medición del IRI.

#### **A. Fase de Campo.**

El proceso inicia con la instalación física del equipo y la recolección de coordenadas.

- **Paso 1: Montaje de la estación total.** Primero, se eligió y marcó el punto de control topográfico, priorizando una ubicación que ofreciera buena visibilidad para avistar la mayor cantidad de puntos posibles y que garantizara la seguridad del operario y del equipo.

A continuación, se procedió al montaje y ajuste del equipo. Se colocó el trípode desplegando sus patas hasta la altura aproximada de la barbilla del operario y se aseguró sobre el punto topográfico, verificando que la cabeza del trípode estuviera nivelada antes de fijar las patas al suelo. Posteriormente, se realizó la nivelación de la estación total en dos etapas: primero ajustando la altura de las patas y luego moviendo los tornillos nivelantes con cuidado hasta centrar la burbuja del nivel, cotejando la nivelación al girar el equipo 90 grados.

- **Paso 2: Toma de datos.** Para la toma de datos, se encendió el aparato, luego desde el menú de configuración, se creó un archivo de trabajo para grabar los datos nuevos. Después se ingresaron los datos de la estación (Punto, Altura Instrumento, Código) y los del Punto de Referencia (PR), seguidamente se visó el PR y usando la función "Orientar" en el menú, se aseguró que el ángulo horizontal sea cero. Finalmente se colocó el prisma sobre cada elemento característico de la carretera (Eje de la vía, bordes de calzada, obras de arte y drenaje), en dirección a la estación y se procedió a registrar sus coordenadas (Este, Norte, Elevación) y descripción. Este proceso se repitió las veces necesarias, estableciendo nuevos puntos de referencia (BM) cuando se requirió cambiar de ubicación.

## B. Fase de Gabinete y Procesamiento.

El procesamiento de la información topográfica se desarrolló utilizando el software AutoCAD Civil 3D 2021. La metodología aplicada consistió en los siguientes pasos:

- Se importó la información topográfica al programa en formato de puntos delimitados por comas (CSV).
- Seguidamente, se generaron y editaron las mallas de triangulación (TIN) en función de las coordenadas y cotas, tomando como criterio la forma del terreno observada durante el trabajo de campo.
- Con la ayuda de los croquis de campo y los puntos del colector, se dibujaron los detalles de la planimetría.
- Finalmente, se obtuvieron las curvas de nivel con sus respectivas cotas, lo que permitió la elaboración y presentación del plano topográfico, planos en planta y secciones típicas.

### **3.4.3. Procesamiento de la Evaluación Funcional**

#### **3.4.3.1. Definición y Justificación de Criterios de evaluación**

Para la definición del modelo de evaluación multicriterio, se seleccionaron criterios y/o parámetros que permitan un diagnóstico integral del estado superficial del pavimento. Siguiendo los lineamientos de gestión de infraestructura vial sugeridos por CONREVIAL (2000) y alineados con estándares internacionales, se establecieron tres ejes fundamentales de análisis:

- A. Comodidad y Calidad de Rodadura (Variable: IRI).** Representa la funcionalidad del pavimento desde la perspectiva del usuario. Se evalúa mediante el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el cual cuantifica las irregularidades longitudinales de la superficie que afectan la vibración del vehículo, los costos de operación y la comodidad de viaje (según normas ASTM E1926 / World Bank).
- B. Condición Superficial Visible (Variable: PCI).** Evalúa el deterioro físico de la carpeta asfáltica. Se utiliza el Índice de Condición del Pavimento (PCI), basado en la norma ASTM D6433, para catalogar la severidad y extensión de las fallas (grietas, deformaciones, desprendimientos). Este criterio es indicativo de la integridad del activo y su necesidad de mantenimiento correctivo.
- C. Seguridad Operacional (Variable: Macrotextura/MTD).** Analiza la capacidad de adherencia neumático-pavimento, crítica para evitar accidentes en condiciones húmedas. Se mide a través de la Profundidad Media de Textura (MTD), obtenida mediante ensayos como el Círculo de Arena (ASTM E965), lo cual permite inferir la resistencia al deslizamiento y el riesgo de hidroplaneo.

La integración de estas tres variables (IRI, PCI, MTD) permitieron obtener un Índice de Evaluación Compuesto (IEC) que no solo considera el daño físico, sino también la calidad del servicio ofrecido al usuario final.

### **3.4.3.2. Metodología de cálculo del PCI (EvalPavCar)**

#### **3.4.3.2.1. Unidades de muestreo**

**A. División en unidades de muestreo (UM).** Se identificó el tipo de vía y sus características geométricas principales.

- Ancho de calzada: 5.50 m
- Longitud total de Tramos en estudio: 426 m
- Longitud de unidad de muestra: 50 m
- Área de muestreo: 275 m<sup>2</sup>

Se obtuvo el número total de muestras:

$$N = \frac{426}{50} = 8.52 \approx 9$$

**B. Determinación de Unidades de Muestreo.** Se reemplazó los valores en la Ecuación 14, y se obtuvo:

$$n = \frac{\frac{9 \times 10^2}{5^2}}{\frac{4}{4} \times (9 - 1) + 10^2} = 6$$

Por lo que, para el tipo de pavimento en estudio se consideró  $e=5\%$  y  $\sigma=10$ .

Obteniendo 6 muestras a evaluar por Tramo en estudio.

**C. Selección de las Unidades de Muestreo para Inspección.** Se recomendó que las unidades elegidas estén igualmente espaciadas. Por lo que se aplicó la Ecuación 15:

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

Reemplazando se tuvo:

$$i = \frac{9}{5} = 1.5 \approx 1$$

Por lo tanto, como primera muestra se seleccionó la unidad de muestreo 2, se continuó con la unidad 3, 4 ,5, etc.

**D. Evaluación de la Condición.** Se identificó, clasificó y cuantificó cada falla presente en la Unidad de Muestreo, luego se registró: tipo de falla, severidad (baja/media/alta) y cantidad (área, longitud o número).

#### 3.4.3.2.2. *Cálculo de PCI*

Para el cálculo del PCI se empleó el Software “EvalPavCar” para agilizar procedimientos de cálculo y evitar posibles errores, como se detalla a continuación.

**A. Creación de Proyecto.** Para iniciar se accedió al Software y se creó un nuevo proyecto. Se ingresaron los datos generales como el nombre de proyecto y ubicación.

**Figura 53**

*Interfaz de EvalPav, creación de Proyecto*



**B. Evaluación.** Como segundo paso se accedió al proyecto previamente creado y se eligió la pestaña de Evaluación.

**Figura 54**

*Interfaz de EvalPav, Evaluación de Pavimento*



**C. Evaluación de pavimento.** Después de mostrarse la ventana de evaluación, se completaron todos los campos necesarios, para luego ingresar las fallas, severidad y extensión que se encontró en campo, finalmente se guardaron los datos y se obtuvo el valor PCI para esa unidad de muestra, tal como se muestra en la Figura 55 para la muestra 1 del tramo 1.

**Figura 55**

*Interfaz de EvalPav para la evaluación de UM 1 de Tramo 1*

TIPO	SEVERIDAD	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	TOTAL	DENSIDAD	VR
13	M	1.0										1.0	0.4	16
19	L	60.0										60.0	21.8	8
7	M	2.0	5.0									7.0	2.6	7
1	M	13.5										13.5	4.9	39

Se realizó el mismo procedimiento para todas las unidades de muestra.

**D. Procedimiento matemático del PCI.** Para la demostración del procedimiento del software se utilizó el Tramo 1, UM 1.

- **Cálculo de la densidad.** Según el inventario de fallas para la UM1 del Tramo 1 se hallaron 4 tipos de fallas (Ver Tabla 52) por lo que se calculó la densidad para cada una de ellas; para la falla de Huecos se obtuvo una densidad de:

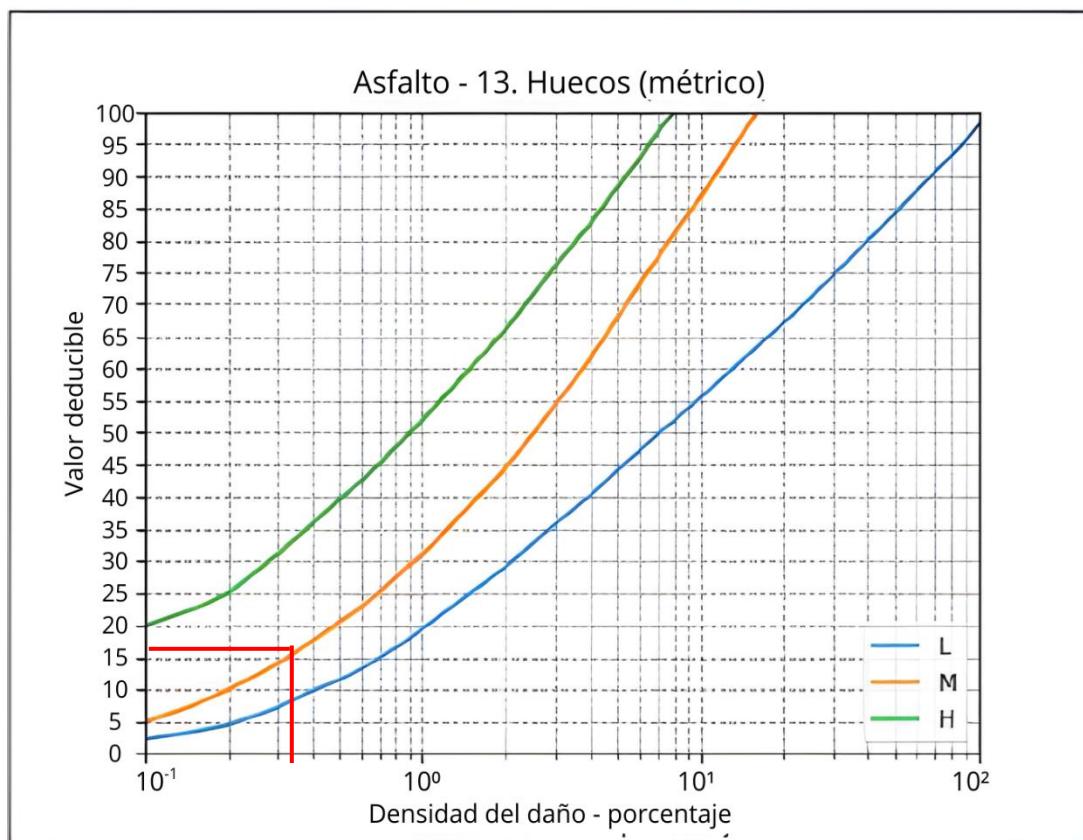
$$Densidad = \frac{1 \text{ (cant. total)}}{275 \text{ (área total UM)}}$$

$$Densidad = 0.36$$

- **Cálculo de Valor Deducido (VD).** Se determinó el VD, para cada tipo de falla por UM, mediante las curvas de “Valor deducido del daño”. Para la falla de “Huecos” de la UM 1 del Tramo 1 se tuvo un  $VD = 16$ , como se muestra en la Figura 56.

**Figura 56**

*Determinación de Valor deducido-UM2, Tramo 1 - Huecos*



- **Cálculo de número Máximo Admisible ( $m_i$ ).** Se calculó el valor  $m_i$  utilizando el mayor VD de cada Unidad de Muestra, para la UM 1 se tuvo el VD mayor igual a 39, perteneciente a la falla de piel de cocodrilo (ver Tabla 27) reemplazando el valor en la Ecuación 16 se tuvo:

$$m_i = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) * (100 - HDV)$$

$$m_i = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) * (100 - 39)$$

$$m_i = 6.60$$

**Tabla 27***Resumen de VD de UM 1 – Tramo 1*

Área m <sup>2</sup>	UM	Cod. Falla	Severidad	01	02	TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
275.0	1	1	M	13.5	0.0	13.5	4.9	39
275.0	1	7	M	2.0	5.0	7.0	2.6	7
275.0	1	19	L	60	0	60	21.8	8
275.0	1	13	M	1.0	0.0	1.0	0.4	16

- **Cálculo de Máximo Valor Deducido Corregido (VDC).** Se determinó mediante el siguiente proceso iterativo:

Primero se determinó el número de VD individuales mayores a 2; para la UM 1 se tuvo q=4.

Luego se determinó el “Valor Deducido Total” sumando TODOS los valores deducidos individuales. Luego se determinó el VDC con  $q$  y el “VD Total” en la curva de corrección pertinente al tipo de pavimento (ver Figura 57).

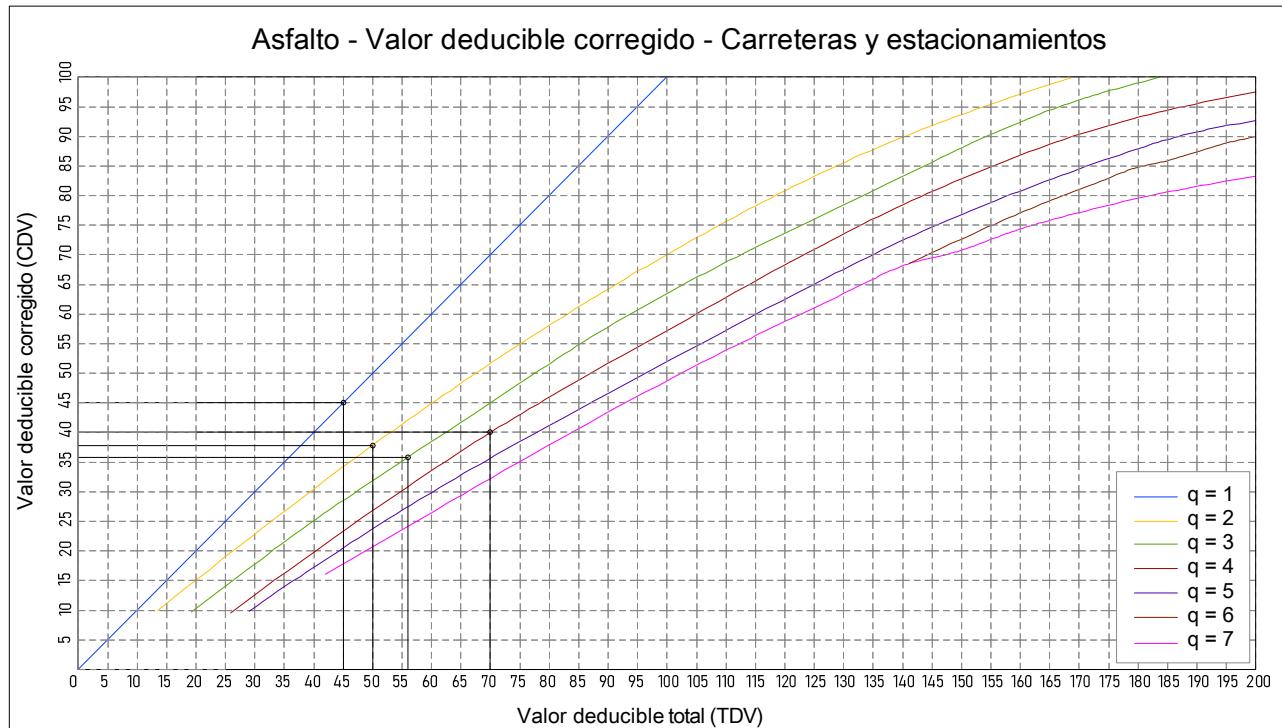
Posteriormente se redujo a 2.0 el menor de los “Valores Deducidos” y se repitió el proceso hasta obtener un “q” = 1. Como se resume en la Tabla 28:

**Tabla 28***Determinación de VD Corregido – UM 1 – TRAMO 1*

Nº Iteraciones	VD Individuales	VD Total	q	VD Correg
1	39 7 8 16	70	4	40
2	39 7 8 2	56	3	36
3	39 7 2 2	50	2	38
4	39 2 2 2	45	1	45

**Figura 57**

*Obtención de VD corregidos en curva de corrección*



- **Cálculo PCI de la Unidad de Muestra.** Finalmente se calculó el PCI para la UM1 del Tramo 1, utilizando el mayor VD Corregido mayor, para el ejemplo visto se tendría VDC máx.= 45, por lo que:

$$PCI = 100 - VDC_{máx}$$

$$PCI = 100 - 45$$

$$PCI = 55$$

Por lo que se obtuvo un PCI= 55 para la UM 1 del Tramo 1, clasificándose como un estado de pavimento “Bueno”

Este cálculo automatizado por el Software fue el mismo para las demás Unidades de Muestra.

- E. **Resultados.** Finalmente se exportaron los datos a una hoja de Excel y se obtuvo un reporte del valor de PCI para cada tramo.

**Figura 58**

*Reporte de resultados de evaluación de Tramo 1*

Nº	AREA (m <sup>2</sup> )	UNIDAD DE MUESTREO	PROGRESIVA		m	VDC	PCI	CLASIFICACION
			INICIAL	- FINAL				
01	275.0	1	00+050	- 00+100	6.4	45	55	Bueno
02	275.0	2	00+100	- 00+150		34	66	Bueno
03	275.0	3	00+150	- 00+200	7.1	36	64	Bueno
04	275.0	4	00+200	- 00+250	8.7	21	79	Muy Bueno
05	275.0	5	00+250	- 00+300		16	84	Muy Bueno
06	275.0	6	00+350	- 00+400		29	71	Muy Bueno
PROMEDIO						70		Muy Bueno

### 3.4.3.3. Metodología de cálculo del IRI (Roadroid).

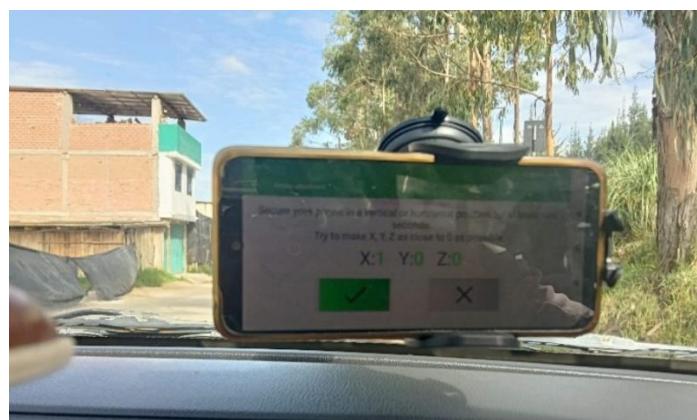
Para el cálculo de IRI se empleó la aplicación Roadroid, siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

#### 3.4.3.3.1. *Recopilación de datos*

- A. Instalación de aplicación.** Como primer paso se descargó la aplicación en un celular con sistema operativo Android, se registró el usuario mediante un correo y contraseña y a la vez se otorgaron los permisos necesarios para su correcto funcionamiento.
- B. Preparación de equipo.** Se instaló un soporte de celular en el auto para mantener el dispositivo móvil seguro y fijo en una sola posición.

**Figura 59**

*Instalación de equipo móvil en soporte de celular*

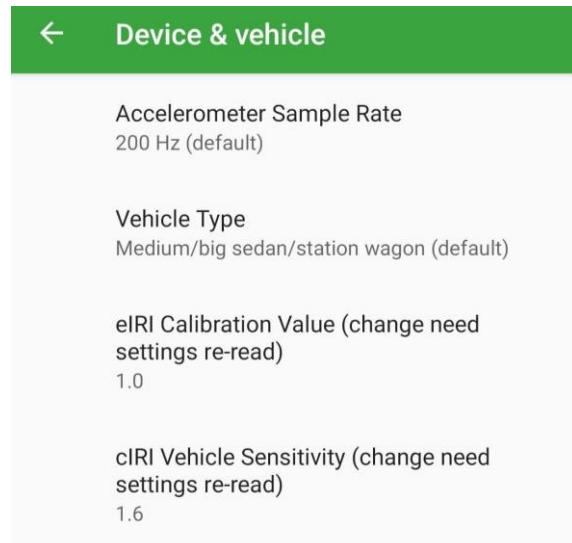


- C. Ejecución de aplicación.** En la aplicación se configuró el tipo de vehículo utilizado, para este estudio se utilizó un Toyota Station Wagon y se clasificó como vehículo

mediano según la aplicación, luego se configuró la opción cIRI Vehicle Sensivity igual a 1.6 ya que se evaluó una carretera asfáltica.

**Figura 60**

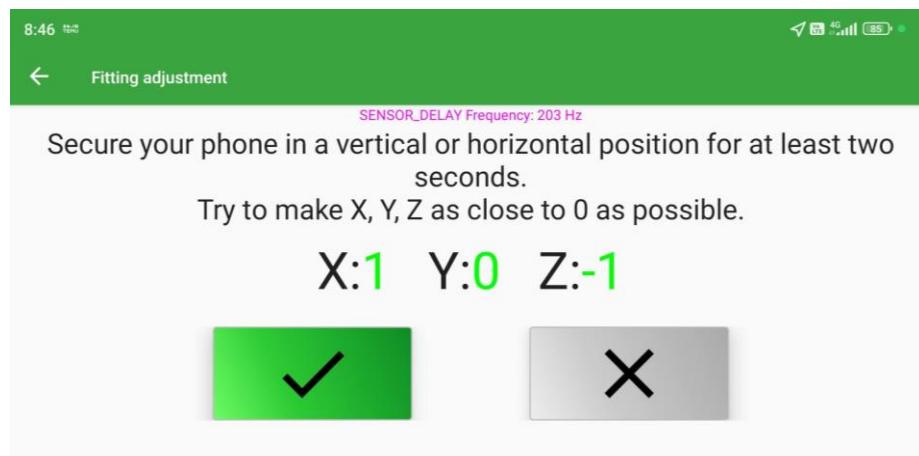
*Configuraciones iniciales en la aplicación Roadroid*



**D. Calibración.** se calibró el equipo acercando los valores de X, Y, y Z a cero o lo más cercano a él.

**Figura 61**

*Calibración de equipo*



**E. Toma de datos.** Finalmente se inició la toma de datos con el carril derecho manteniendo una velocidad constante de 60 km/h. Se inició con el carril derecho y luego se prosiguió con el izquierdo.

**Figura 62**

*Inicio de recorrido con Roadroid en Progresiva 0+00 km*



**Figura 63**

*Toma de datos con Roadroid en carril izquierdo*



### **3.4.3.3.2. Importación de datos**

- A. **Descarga de datos.** Después de la recolección de datos en campo, se accedió a la aplicación de Roadroid para obtener los datos recolectados. Luego se importaron a una hoja Excel para su manejo.
- B. **Análisis de datos.** Se dividieron los datos según las progresivas de cada Tramo en estudio. Se eligió el cIRI ya que diversos estudios (Ramirez Castro, 2017) muestran que son los más precisos en carreteras asfálticas a diferencia del IRI estimado (eIRI).

**C. Procedimiento Matemático para el cIRI.** Los datos de entrada que la aplicación recolecta son dos variables físicas fundamentales a una frecuencia de 100 Hz. La Aceleración Vertical ( $a_z$ ): La vibración en el eje Z medida por el acelerómetro y la Velocidad (v): Medida por el GPS.

- El algoritmo para el cálculo del IRI toma la aceleración medida, la filtra para eliminar la gravedad y el ruido, y calcula el desplazamiento vertical acumulado de la suspensión simulada por unidad de distancia recorrida, como se describe en la Ecuación 17:
- Tras resolver la integral de movimiento, se determinó que el desplazamiento acumulado para el tramo 1, carril derecho, progresiva 0+050 y un factor de calibración (S): 1.6 (ver Figura 38) fue:

$$IRI_{bruto} = \frac{\text{Desplazamiento Acumulado}}{\text{Distancia Recorrida}}$$

$$IRI_{bruto} = \frac{0.01375}{0.01} = 1.375 \text{ m/km}$$

- Posteriormente la aplicación Roadroid ajustó ese valor bruto usando la Ecuación 18:

$$cIRI_{final} = cIRI_{bruto} \times S$$

$$cIRI_{final} = 1.375 \times 1.6$$

$$cIRI_{final} = 2.20 \text{ m/km}$$

Por lo que se obtuvo un cIRI de 2.20 m/km para esa progresiva (Ver Tabla 62)

**D. Resultados.** Después de obtener los valores cIRI para cada tramo, éstos se promediaron y se obtuvo un único valor representativo para cada Tramo, éste finalmente se clasificó dentro de una escala que midió el nivel de confort del conductor.

### **3.4.3.4. Cálculo de MTD (Profundidad Media de Textura).**

Se empleó el ensayo de círculo de arena para la clasificación del nivel de seguridad de cada tramo relacionado a la resistencia al deslizamiento, según los valores de macrotextura obtenidos.

#### **3.4.3.4.1. *Ensayo de Circulo de arena***

**A. Preparación de equipo.** Para el ensayo se utilizó: una probeta de 50 ml, arena fina que pasa la malla n°100, una regla, disco esparcidor con mango y recubierta de goma, cepillo de cerdas duras y brocha suave de 2”.

**Figura 64**

*Equipo utilizado para ensayo círculo de arena*



**B. Muestra.** Se utilizó un muestreo puntual, eligiendo dos puntos críticos por carril de cada tramo (curvas, intersecciones, ingresos). Los ensayos se repitieron 3 veces por cada ubicación.

**C. Preparación de pavimento.** Se limpió con el cepillo de cerdas duras y con la brocha el área del pavimento ensayada, verificando que se encuentre seca y libre de impurezas.

**Figura 65**

*Limpieza de área de muestra*



**D. Colocación de arena en superficie.** Se llenó la probeta con la arena, golpeándola hasta garantizar los volúmenes deseados de 10, 25 y 50 cm<sup>3</sup> y se vertió sobre el pavimento.

**Figura 66**

*Vaciado de arena sobre superficie de pavimento*



**E. Círculo de arena.** Posteriormente se distribuyó con ayuda del disco, formando un círculo hasta que se empezó a notar las imperfecciones del pavimento

**Figura 67**

*Formación de círculo de arena*



- F. **Diámetro.** Se midió tres veces el diámetro del círculo formado, con ayuda de una regla en diferentes direcciones.

**Figura 68**

*Medición del diámetro de círculo de arena*



G. **Cálculos.** Finalmente se calculó la profundidad de textura utilizando la Ecuación 20.

Y se promediaron los resultados encontrados en un mismo tramo, como se muestra a continuación de la muestra N°2 del tramo 2, carril derecho.

Se realizó el cálculo para:

$$D_1 = 23 \text{ cm}$$

$$V_1 = 50 \text{ cm}^3$$

Reemplazando en la Ecuación 20 se tuvo:

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2}$$

$$MTD = \frac{4(50)}{\pi(23)^2}$$

$$MTD_1 = 1.203 \text{ cm}$$

Se realizó el mismo procedimiento para  $D_2 = 16 \text{ cm}$ ,  $V_2 = 25 \text{ cm}^3$  y  $D_3 = 9 \text{ cm}$ ,  $V_3 = 10 \text{ cm}^3$ , obteniendo:

$$MTD_2 = 1.24 \text{ cm}$$

$$MTD_3 = 1.57 \text{ cm}$$

Promediando se obtiene: MTD=1.24

Se realizó el mismo procedimiento para todos los puntos de muestra seleccionados

### **3.5. Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados.**

#### ***3.5.1. Tratamiento y análisis de datos.***

##### **3.5.1.1. Fase de ponderación de criterios: FAHP**

**Tipo de análisis:** Se realizó un análisis matricial utilizando el Proceso Analítico Jerárquico Difuso. Los datos recolectados de los expertos fueron sometidos primero a una prueba de consistencia matemática, calculando el Índice de Consistencia (CI) y la Relación de Consistencia (CR); posteriormente, se aplicó la media geométrica para agregar los juicios individuales en una única

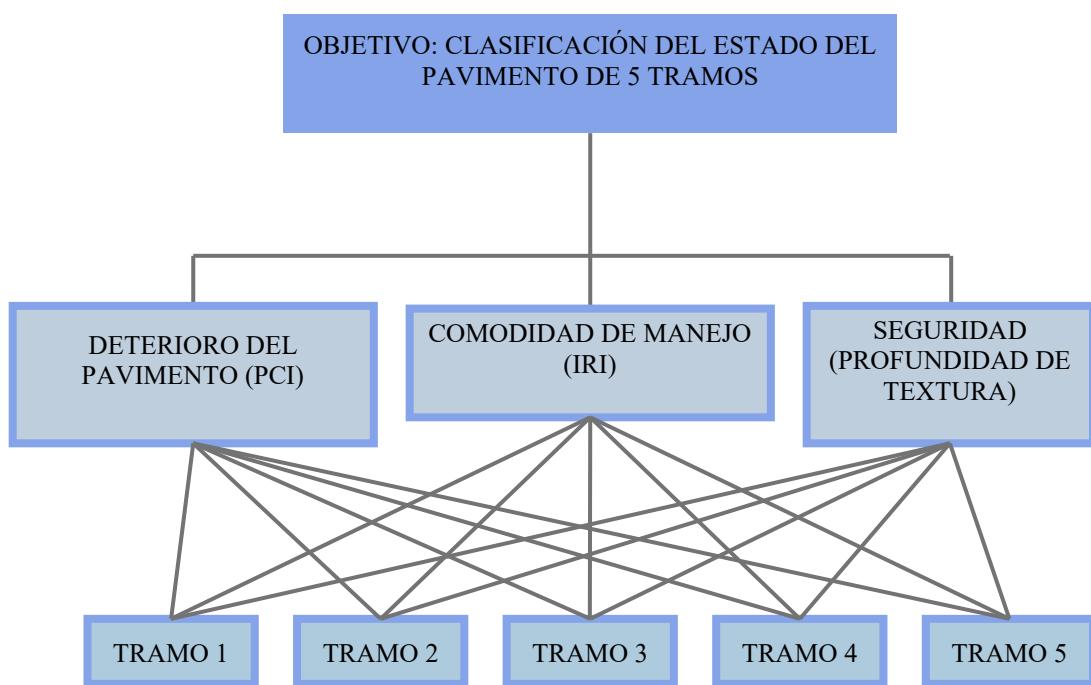
matriz difusa representativa, obteniendo así los vectores de peso ( $D_i$ ) para los criterios IRI, PCI y MTD.

A continuación, se muestran los pasos para su obtención.

**A. Estructuración Jerárquica.** La estructuración del problema es sin duda el paso más importante en el proceso de la toma de decisiones, aquí se seleccionaron, y definieron los criterios que son importantes para la toma de decisión y que luego fueron acomodados jerárquicamente en diferentes niveles, que van desde el objetivo hasta las alternativas.

**Figura 69**

*Árbol de Jerarquización*



**B. Matrices pareadas de comparación de expertos.** Para la determinación de matrices de comparación pareada se realizó una entrevista a cada uno de los 5 expertos que se presentan en la **Tabla 29**. La selección de los expertos se dio por el cargo, experiencia y/o conocimiento en carreteras de pavimento asfáltico, para tener una evaluación más general analizada desde diferentes enfoques, como se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 29***Grupo de expertos involucrados en la toma de decisiones*

Nº	Nombres y Apellidos	Experiencia
1	Ing. Richard Gerard Vásquez Fernández	Residente de obras viales pavimento flexible
2	Ing. Ana Liliana Murrugarra Sánchez	Residente de obras viales pavimento flexible
3	Ing. Kevin Geampierre Manco Castillo	Residente de obras viales pavimento flexible
4	Ing. Jaime Antonio Villacorta Delgado	Residente de obras viales pavimento flexible
5	Ing. Eddy Alvarado Rafael	Provias - Especialista en Mantenimiento y supervisión vial

Las preguntas realizadas fueron las siguientes:

“Para la determinación del estado funcional del pavimento flexible de una carretera” ....

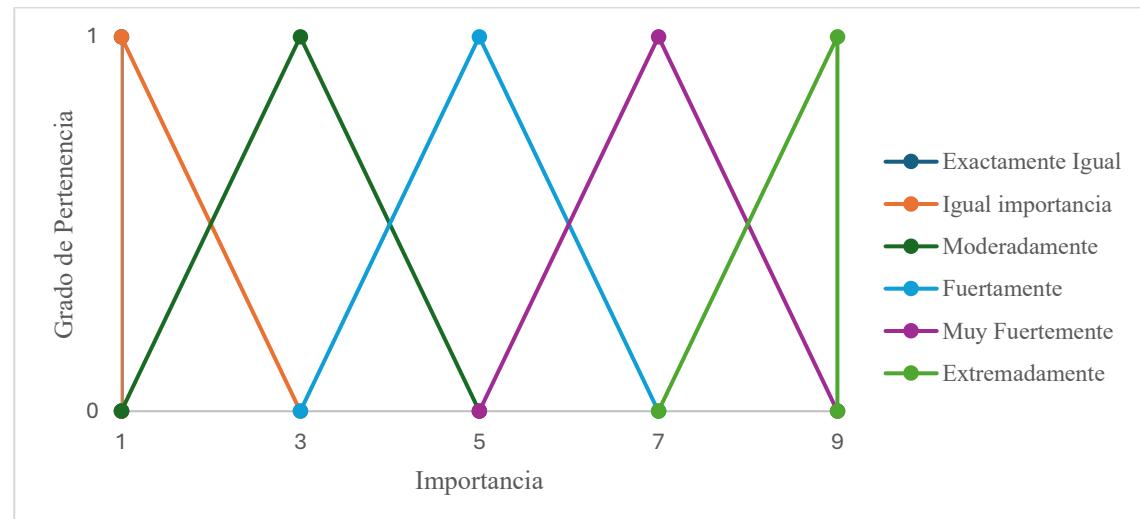
- ¿Qué criterio entre el Deterioro del Pavimento y la Comodidad de manejo considera más importante? Y ¿Qué tan importante?
- ¿Qué criterio entre el Deterioro del Pavimento y la Seguridad de manejo considera más importante? Y ¿Qué tan importante?
- ¿Qué criterio entre la Comodidad de manejo y la Seguridad de manejo considera más importante? Y ¿Qué tan importante?

Estas preguntas fueron aplicadas a los 5 expertos entrevistados, para la ponderación de los 3 criterios.

Se utilizó la propuesta planteada por Kabir y Hasin, la cual propone variables lingüísticas para determinar los pesos difusos o de importancia para cada criterio, subcriterio e indicador.

**Tabla 30***Escala lingüística difusa propuesta por Kabir & Akhtar Hasin (2011)*

Escala Lingüística para la importancia	Número Difuso	Función de Membresía	Dominio	Escala difusa Triangular (l,m,n)
Exactamente Igual				(1,1,1)
Igual Importancia	1	$\mu_M(x) = (3 - x)/(3 - 1)$	$1 \leq x \leq 3$	(1,1,3)
Moderadamente Importante	3	$\mu_M(x) = (x - 1)/(3 - 1)$ $\mu_M(x) = (5 - x)/(5 - 3)$	$1 \leq x \leq 3$ $3 \leq x \leq 5$	(1,3,5)
Fuerte Importancia	5	$\mu_M(x) = (x - 3)/(5 - 3)$ $\mu_M(x) = (7 - x)/(7 - 5)$	$3 \leq x \leq 5$ $5 \leq x \leq 7$	(3,5,7)
Muy Fuerte importancia	7	$\mu_M(x) = (x - 5)/(7 - 5)$ $\mu_M(x) = (9 - x)/(9 - 7)$	$5 \leq x \leq 7$ $7 \leq x \leq 9$	(5,7,9)
Extremadamente Preferido	9	$\mu_M(x) = (x - 7)/(9 - 7)$	$7 \leq x \leq 9$	(7,9,9)
Si la actividad i tiene uno de los números diferente de cero ya nombrados, cuando se compara con la actividad j, tiene el valor recíproco cuando se compara con la actividad i.				Valores Recíprocos $\tilde{M}_1^{-1} = (\frac{1}{n_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1})$

**Figura 70***Función de Membresía Triangular de comparaciones pareadas*

Se realizó una comparación pareada de los criterios de evaluación, gráficamente se planteó una matriz de nxn, donde “n” será igual a la cantidad de variables, en este caso n=4.

**Figura 71**

*Matriz de comparación de pareada*

	C1	C2	...	C <sub>n</sub>
C1				
C2				
...				
C <sub>n</sub>				

Para realizar esta comparación la matriz debe ser siempre cuadrada, las casillas interiores se llenaron con los valores de la **Tabla 30** según el criterio de cada experto.

**C. Consistencia de Juicios.** Para validar los juicios se sometió a una evaluación individual de medición de consistencia por cada experto. Como se describe a continuación el ejemplo de la matriz del experto N°1 (Tabla 47).

- Se construyó una matriz crisp (valor único) usando los valores  $m$  de la matriz pareada del experto, y se sumó los valores por columnas.

$$A: \begin{bmatrix} & 1 & 1 & 5 \\ 1 & & & \\ 1 & 1 & & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & \end{bmatrix}$$

2.20                  2.33                  9.00

- Se normalizó la matriz dividiendo cada valor de la matriz entre la suma de valores de la columna, obteniendo la matriz normalizada:

$$\begin{bmatrix} 0.4545 & 0.4286 & 0.5556 \\ 0.4545 & 0.4286 & 0.3333 \\ 0.0909 & 0.1429 & 0.1111 \end{bmatrix}$$

- Seguidamente se promedió las filas para obtener el vector columna ( $w$ )

Promedio de filas ( $w$ ):

$$\begin{bmatrix} 0.4796 \\ 0.4055 \\ 0.1150 \end{bmatrix}$$

- Se continuó con el cálculo del Vector Fila Total multiplicado la matriz A por el Vector Columna w.

$$\begin{array}{l} \text{Matriz original (A):} \\ \left[ \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{array} \right] \quad * \quad \begin{array}{l} \text{Prom. De filas (w)} \\ \left[ \begin{array}{c} 0.4796 \\ 0.4055 \\ 0.1150 \end{array} \right] \end{array} = \begin{array}{l} \left[ \begin{array}{c} 1.4598 \\ 1.2299 \\ 0.3460 \end{array} \right] \end{array} \end{array}$$

- Posteriormente se calculó el vector cociente, dividiendo el Vector Fila Total entre el Vector Promedio.

$$\begin{array}{l} \text{vec. Fila total (A * w)} \\ \left[ \begin{array}{c} 1.4598 \\ 1.2299 \\ 0.3460 \end{array} \right] \quad \div \quad \begin{array}{l} \text{vec. Promedio (w)} \\ \left[ \begin{array}{c} 0.4796 \\ 0.4055 \\ 0.1150 \end{array} \right] \end{array} = \begin{array}{l} \text{Vector cociente} \\ \left[ \begin{array}{c} 3.044 \\ 3.033 \\ 3.010 \end{array} \right] \end{array} \end{array}$$

- Seguidamente se calculó el valor propio máximo ( $\lambda_{max}$ ), calculando el promedio de los valores del vector cociente, como se indica:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(A * w)_i}{w_i} \right)$$

$$\lambda_{max} = \frac{(3.044 \times 3.033 \times 3.010)}{n}$$

$$\lambda_{max} = 3.029$$

- Luego se obtuvo el valor del Índice de Consistencia:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$IC = \frac{3.029 - 3}{3 - 1}$$

$$IC = 0.01456$$

- Finalmente se calculó la razón de consistencia (RC) teniendo en cuenta que para una matriz de 3x3, el valor del Índice de Consistencia Aleatorio (ICA) es igual a 0.58 (Tabla 4), reemplazando en la ecuación se tiene:

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0.01456}{0.58}$$

$$RC = 0.0251$$

$$RC = 2.51 \%$$

- Por lo que se consideró a la matriz realizada por el Experto N°1 consistente, ya que  $RC=2.51\% < 10\%$ .

**D. Vector de Pesos Individuales.** Se empleó el Método de Análisis de Extensión con Números Difusos Triangulares para calcular el vector de prioridad individual de cada experto. Continuando con el ejemplo anterior, para los valores de la matriz del Experto 1 (Tabla 47) se tuvo:

- Como primer paso se sumaron los valores  $l$ ,  $m$  y  $n$  de cada fila de la matriz de la

**Tabla 47,** obteniendo:

	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
C1:	[ 5.00 ]	[ 7.00 ]	[ 11.00 ]
C2:	[ 2.33 ]	[ 5.00 ]	[ 7.00 ]
C3:	[ 1.34 ]	[ 1.53 ]	[ 2.33 ]
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	8.68	13.53	20.33

- Seguidamente se calculó el valor de la Extensión Sintética Difusa con respecto al objeto  $i$ , usando la ecuación:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j * \left[ \sum_{i=l}^n \sum_{j=l}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$$

Reemplazando se tuvo:

C1:	$[ 5.00 \quad 7.00 \quad 11.00 ]$	$\begin{matrix} [ 0.05 \quad 0.07 \quad 0.12 ] \\ \times \\ [ 0.05 \quad 0.07 \quad 0.12 ] \end{matrix}$
C2:	$[ 2.33 \quad 5.00 \quad 7.00 ]$	$\begin{matrix} [ 0.05 \quad 0.07 \quad 0.12 ] \\ \times \\ [ 0.05 \quad 0.07 \quad 0.12 ] \end{matrix}$
C3:	$[ 1.34 \quad 1.53 \quad 2.33 ]$	$\begin{matrix} [ 0.05 \quad 0.07 \quad 0.12 ] \\ \times \\ [ 0.05 \quad 0.07 \quad 0.12 ] \end{matrix}$

$l_i$	$m_i$	$u_i$	$i$
0.246	0.517	1.268	1
0.115	0.369	0.807	2
0.066	0.113	0.269	3

- Se continuó calculando del grado de posibilidad de que un número difuso Si sea mayor o igual que otro número difuso Sj. Luego se calculó los valores mínimos para cada criterio y se normalizó el vector, según la ecuación:

$$V(S_1 \geq S_2) = \begin{cases} 1, si m_1 \geq m_2 \\ 0, si l_2 \geq u_1 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, en otro caso \end{cases}$$

C1:  $\begin{cases} V(S1 \geq S2) &= 1 \\ V(S1 \geq S3) &= 1 \end{cases}$  Val. Min Normalización  
1.00 0.542

C2:  $\begin{cases} V(S2 \geq S1) &= 0.79 \\ V(S2 \geq S3) &= 1.00 \end{cases}$  0.79 0.429

C3:  $\begin{cases} V(S3 \geq S1) &= 0.05 \\ V(S3 \geq S2) &= 0.38 \end{cases}$  0.05 0.029

**1.85**

- Finalmente se obtuvo el peso para cada criterio:

Seguridad de Manejo (MTD) :	54.19%
Deterioro de Pavimento (PCI) :	42.89%
Comodidad de Manejo (IRI) :	2.92%
<hr/>	
100.00%	

- Se realizó el mismo procedimiento para las otras matrices de los expertos.

**E. Integración de Juicios: Agregación de Prioridades Individuales (AIP).** Esta técnica consistió en la integración final de los resultados ponderados según cada experto, para ello se utilizó la media Geométrica normalizada obteniendo finalmente la ponderación y peso para cada criterio.

### **3.5.1.2. Fusificación de Variables de Entrada**

Una vez recopilados los datos de campo correspondientes al Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el Índice de Condición del Pavimento (PCI) y la Profundidad de Textura (MPT), se procedió a la etapa de fusificación (fuzzification). El objetivo de esta fase fue transformar las mediciones deterministas (valores únicos o crisp) en conjuntos difusos capaces de ser procesados por el algoritmo FWA.

Este procedimiento fue necesario para homogeneizar las diferentes unidades de medida (m/km, adimensional y mm).

**A. Valores de entrada.** De la fase anterior se organizaron los datos en una tabla para su mejor interpretación y análisis, teniendo en cuenta las unidades de medida de cada criterio, los valores se dividieron en secciones de 50 m

- **Índice de Rugosidad Internacional (IRI):** Se consideró como el indicador principal de la condición funcional y el confort del usuario. Los datos se obtuvieron con la aplicación Roadroid y su unidad de medida fue los m/km.
- **Índice de Condición del Pavimento (PCI):** Se integró como el indicador representativo de la integridad superficial y estructural visible. Los datos se obtuvieron con software EvalPavCar y su unidad de medida fue la escala numérica de 0 a 100.
- **Profundidad Media de Textura (MTD):** Se seleccionó como el criterio crítico de seguridad vial. Los datos se obtuvieron del Ensayo círculo y su unidad de medida fue en mm.

**B. Escalas de clasificación.** Se recopilaron los rangos de los 3 criterios, basados en la normativa peruana (MTC) y normas internacionales estándar (ASTM). Estos rangos ya han sido verificados y sustentados previamente, por lo que solo se ha realizado una adaptación para que encajen a la clasificación de 5 categorías que considera este estudio.

**Tabla 31***Escala de clasificación del IRI*

Escala Lingüística	Rango Numérico (m/km)	Descripción Técnica
<b>Muy Bueno</b>	0.0 - 2.0	Pavimento nuevo o recién rehabilitado. Cumple exigencias de recepción de obra.
<b>Bueno</b>	2.0 - 3.5	Pavimento en servicio con deterioro leve. Confortable a velocidad de diseño.
<b>Regular</b>	3.5 - 5.0	Deterioro notable. Se siente vibración. Requiere mantenimiento preventivo o ligero.
<b>Malo</b>	5.0 - 8.0	Rugosidad incómoda. Velocidad de operación reducida. Requiere rehabilitación.
<b>Muy Malo</b>	> 8.0	Pavimento severamente dañado. Velocidad muy reducida. Posible reconstrucción.

*Nota: Adaptado de MTC (2014) y el Federal Highway Administration (2008)***Tabla 32***Escala de clasificación del PCI*

Escala Lingüística	Rango PCI (0-100)	Equivalencia ASTM D6433
<b>Muy Bueno</b>	70 - 100	Agrupa: Excellent, Good
<b>Bueno</b>	55 - 70	Satisfactory
<b>Regular</b>	40 - 55	Fair
<b>Malo</b>	25 - 40	Poor
<b>Muy Malo</b>	0 - 25	Agrupa: Very Poor, Serious

*Nota: Adaptado de Pavement Condition Index (Pci) Para Pavimentos Asfálticos Y De Concreto En Carreteras por Vásquez Varela (2002)***Tabla 33***Escala de clasificación de la Profundidad de Textura*

Escala Lingüística	Rango Numérico (mm)	Descripción técnica (Seguridad)
<b>Muy Bueno</b>	> 1.2	Excelente drenaje superficial. Riesgo de hidroplaneo casi nulo.
<b>Bueno</b>	0.8 - 1.2	Textura adecuada para carreteras de alta velocidad (Norma típica > 0.8 mm).
<b>Regular</b>	0.6 - 0.8	Aceptable para velocidades medias/bajas. Adherencia límite en lluvia intensa.
<b>Malo</b>	0.4 - 0.6	Textura lisa. Peligroso en mojado a velocidad media.
<b>Muy Malo</b>	< 0.4	Superficie pulida ("espejo"). Alto riesgo de accidentes por deslizamiento.

*Nota: Adaptado de ASTM E965-15, PIARC (2023) y Guide for Pavement Friction (2009)*

**C. Fusificación.** Los valores de clasificación de cada criterio que se presentó en la tabla 38, 39 y 40, se transformaron en números difusos triangulares ( $l$ ,  $m$ ,  $u$ ) que varían de 0 a 1, teniendo como referencia la propuesta de Singh et al. (2018)

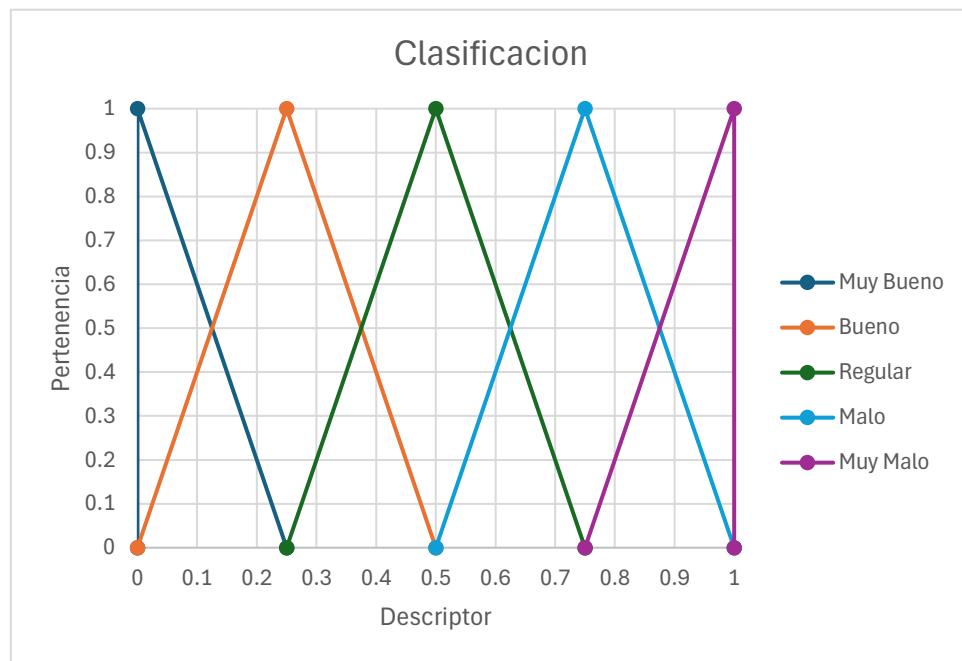
**Tabla 34**

*Escala lingüística y fusificada de los criterios.*

VALORES DE RANGO				
Escala Lingüística	IRI (m/km)	Rango PCI	Profundidad de textura (mm)	VALORES TFN
<b>Muy Bueno</b>	0.0 - 2.0	70 - 100	> 1.2	(0, 0, 0.25)
<b>Bueno</b>	2.0 - 3.5	55 - 70	0.8 - 1.2	(0, 0.25, 0.5)
<b>Regular</b>	3.5 - 5.0	40 - 55	0.6 - 0.8	(0.25, 0.5, 0.75)
<b>Malo</b>	5.0 - 8.0	25 - 40	0.4 - 0.6	(0.5, 0.75, 1)
<b>Muy Malo</b>	> 8.0	0 - 25	< 0.4	(0.75, 1, 1)

**Figura 72**

*Función de membresía para la clasificación de criterios de evaluación*



*Nota:* Adaptado de *Pavement condition assessment using soft computing techniques* por Singh et al. (2018)

**D. Valores de salida.** Finalmente se transformaron los datos recolectados en campo en números difusos triangulares.

### 3.5.1.3. Agregación y Desfusificación: FWA

**Tipo de Análisis:** Los datos de campo (IRI, PCI, MTD) fueron analizados mediante estadística descriptiva (promedios por tramo) y posteriormente normalizados a una escala difusa [0, 1] mediante funciones de pertenencia. El análisis central consistió en la aplicación del algoritmo del Promedio Ponderado Difuso (FWA), el cual integra los pesos obtenidos del FAHP con los indicadores de campo. Finalmente, para la interpretación de los resultados, se aplicó el método de Desfusificación por Centro de Área (COA), transformando el número difuso resultante en un valor único (crisp) que para esta investigación fue denominado el Índice de Evaluación Compuesto (IEC), que permitió clasificar el estado de la vía en una categoría específica.

El algoritmo de cálculo para determinar el índice  $\tilde{Y}$  se ejecuta en tres pasos secuenciales:

A. **Valoración ponderada de cada criterio.** Cada calificación difusa  $\tilde{R}_i$  se multiplicó por su peso correspondiente de cada tramo  $\tilde{W}_i$ . Según la aritmética de los números difusos, la multiplicación de un escalar positivo por un TFN afecta a sus tres componentes linealmente como se detalla a continuación para el Tramo 1.

$$\tilde{V}_i = W_i \times \tilde{R}_i(l_i, m_i, u_i)$$

$$\begin{array}{c}
 \text{Matriz difusa: } \tilde{R}_i & \quad \quad \quad \text{Vector de} \\
 & \quad \quad \quad \text{Pesos: } W_i \\
 \text{PCI (1-100)} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.25 \\ 0 & 0.25 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{pmatrix} & \times & \begin{pmatrix} 0.430 \\ 0.172 \\ 0.398 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \text{Valoraciones Ponderadas: } V_i \\
 = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.11 \\ 0.00 & 0.04 & 0.09 \\ 0.00 & 0.00 & 0.10 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

B. **Suma de valoraciones.** Se sumaron las valoraciones ponderadas  $V_i$  de todos los criterios para obtener el número difuso final  $\tilde{Y}_i$ , tal como lo indica la Ecuación 12. La

suma de TFNs se realizó sumando componente a componente los límites inferiores, modales y superiores, siguiendo con el ejemplo anterior del Tramo 1, se tiene:

$$\tilde{Y}_i = \sum_{I=1}^n W_i \times \tilde{R}_i$$

$$\tilde{Y}_{T1} = (0.00; 0.04; 0.29)$$

**C. Desfusificación del Resultado (Defuzzification).** Para la toma de decisiones y la clasificación final del estado del pavimento, fue necesario convertir el número difuso  $\tilde{Y}_i$  en un valor nítido (crisp) representativo  $Y_i$ . Para ello se utilizó el método del Centroide (Center of Area - COA) para números triangulares, dada por la Ecuación 11.

Siguiendo con el ejemplo anterior, se tiene:

$$Y = \frac{l + m + u}{3}$$

$$Y = \frac{(0 + 0.04 + 0.29)}{3} = 0.11$$

Se realizó es mismo procedimiento para los demás tramos y se clasificó.

### 3.5.1.4. Definición de la Escala del Índice de Evaluación Compuesta (IEC)

Una vez obtenido el valor numérico nítido tras el proceso de desfusificación, se procedió a la categorización del estado del pavimento. A este indicador final se le denominó Índice de Evaluación Compuesta (IEC). Para su interpretación, se formuló una escala estandarizada que vinculó el resultado matemático con la condición operativa de la vía y las necesidades de mantenimiento.

La construcción de dicha escala fue el resultado de los siguientes criterios técnicos y normativos:

**A. Definición del Universo de Discurso y Polaridad del IEC.** Se estableció el universo de discurso del IEC en el intervalo cerrado  $[0, 1]$ , tal como lo establecen autores como Singh et al. (2018). Se dividió el universo de discurso en cinco conjuntos difusos

triangulares y trapezoidales, correspondientes a las etiquetas lingüísticas: 'Muy Malo', 'Malo', 'Regular', 'Bueno' y 'Muy Bueno', luego se definió la polaridad del indicador de la siguiente manera: El valor 0 (cero) representó la condición óptima o ausencia de deterioro ("Muy Bueno"). El valor 1 (uno) representó la pertenencia total al estado de falla o deterioro máximo ("Muy Malo").

Esta partición no es arbitraria, sino que responde a una distribución basada en la escala de Singh et al. (2018) que permite transformar el valor numérico agregado en una categoría cualitativa. Por tanto, un valor de IEC (ej. 0.51) pertenece al conjunto 'Regular' debido a que su grado de pertenencia es mayor en dicha etiqueta que en las adyacentes, tal como se muestra en la Figura 73.

**B. Criterio de Equidistancia (Partición Simétrica).** Para garantizar la consistencia con las cinco variables lingüísticas utilizadas en la fase de evaluación (FAHP), se aplicó el Principio de Máxima Entropía. Se segmentó el rango unitario en cinco intervalos equidistantes de amplitud  $\delta = 0.2$ , calculados mediante la relación.

$$\delta = \frac{\text{Rango máximo} - \text{Rango mínimo}}{\text{Nº de Categorías}} = \frac{1 - 0}{5} = 0.2$$

Esta segmentación permitió establecer umbrales de transición claros en los valores 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8, eliminando la ambigüedad en la clasificación del IEC.

**C. Homologación Normativa de estrategias de Intervención.** Para dotar de aplicabilidad técnica al Índice de Evaluación Compuesta, se realizó una homologación entre los rangos numéricos definidos y las normativas de gestión vial vigentes. Se utilizaron como referencia las actividades estipuladas en el Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial del MTC (2016a) y las recomendaciones de la norma ASTM D6433-20.

La correlación se estableció bajo la siguiente lógica:

- Para  $IEC < 0.4$ : Se asoció a estados de conservación donde la estructura del pavimento se mantenía íntegra, requiriendo intervenciones de tipo Rutinario o Preventivo.
- Para  $0.4 \leq IEC < 0.6$ : Se identificó como una fase de transición o alerta, vinculada a la Conservación Periódica.
- Para  $IEC \geq 0.6$ : Se relacionó con estados de deterioro severo o falla, correspondiendo a estrategias de Rehabilitación o Reconstrucción.

Como resultado de este procedimiento, se generó la matriz de clasificación que rigió el análisis de los resultados, tal como se presenta en la Tabla 35.

**Tabla 35**

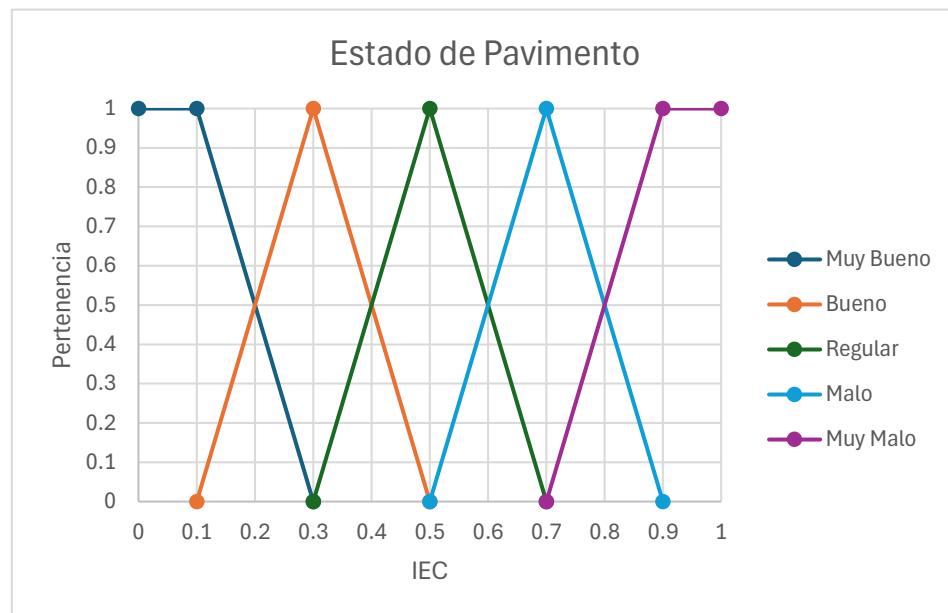
*Escala de Clasificación del Índice de Evaluación Compuesta (IEC)*

Rango de Valor Final IEC (Y)	Clasificación del Estado	Descripción del Deterioro	Estrategia de Intervención
$0.0 \leq IEC < 0.2$	MUY BUENO	Deterioro Insignificante. La vía está casi perfecta (valor cercano a 0).	Mantenimiento Rutinario: Limpieza y monitoreo. No requiere inversión mayor.
$0.2 \leq IEC < 0.4$	BUENO	Deterioro Leve. Empiezan a aparecer signos menores, pero no afectan la operación.	Mantenimiento Preventivo: Sellado de fisuras puntuales.
$0.4 \leq IEC < 0.6$	REGULAR	Deterioro Moderado. El daño es evidente. Punto de inflexión crítico.	Mantenimiento Correctivo Ligero: Tratamientos superficiales
$0.6 \leq IEC < 0.8$	MALO	Deterioro Severo. El valor alto indica fallas estructurales o funcionales graves.	Rehabilitación Mayor: Fresado y reposición, refuerzo estructural.
$0.8 \leq IEC \leq 1.0$	MUY MALO	Falla Total. El pavimento ha alcanzado su máximo nivel de daño (valor cercano a 1).	Reconstrucción: Demolición total y reconstrucción.

*Nota: Elaboración propia, basado en Manual de Carreteras MTC (2014) y ASTM D6433*

**Figura 73**

*Funciones de pertenencia de salida para la clasificación del IEC*



*Nota:* Se muestra la partición del universo de discurso  $[0, 1]$  en cinco conjuntos lingüísticos equidistantes. Adaptado de *Pavement condition assessment using soft computing techniques* por Singh et al. (2018)

### 3.5.2. Resultados

Los hallazgos de la investigación se presentaron de forma sistemática para facilitar su interpretación y discusión, utilizando los siguientes recursos

#### Tablas:

- Coordenadas de Ubicación de Tramos.
- Tabla de pesos difusos y pesos únicos normalizados.
- Resumen de valores promedio de IRI, PCI y MTD por cada tramo.
- Tabla final de Clasificación del Estado del Pavimento

#### Figuras y Gráficos:

- Gráfico radial comparativo de indicadores.
- Diagramas de barras comparando el índice de estado de cada tramo.

#### Planos

- Plano topográfico, de planta y secciones típicas.

## 4. CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Análisis y discusión de resultados según objetivos planteados.

#### 4.1.1. *Objetivo específico 1: Identificar los tramos en estudio*

Como resultado de la inspección preliminar y el levantamiento topográfico, se definió el área de estudio en la carretera CA-1071, abarcando una longitud total de 2.13 km dividida en cinco tramos de 426 metros cada uno.

Desde el punto de vista social, se identificó como una vía vecinal perteneciente a una zona periurbana emergente y en expansión, con múltiples ramificaciones a trochas carrozables y caminos no pavimentados.

En la tabla 36 se puede identificar las coordenadas de inicio y final de cada tramo, así como la progresiva correspondiente.

**Tabla 36**

*Ubicación de tramos*

TRAMO	UBICACIÓN	PROGRESIVA	COORDENADAS	
			ESTE	NORTE
T1	Inicio	0+00 km	780963.96 m	9208798.08 m
	Final	0+426 km	780787.958 m	9209171.66 m
T2	Inicio	0+426 km	780787.958 m	9209171.66 m
	Final	0+852 km	780432.044 m	9209290.84 m
T3	Inicio	0+852 km	780432.044 m	9209290.84 m
	Final	1+278 km	780167.519 m	9209610.91 m
T4	Inicio	1+278 km	780167.519 m	9209610.91 m
	Final	1+704 km	780058.886 m	9210017.3 m
T5	Inicio	1+704 km	780058.886 m	9210017.3 m
	Final	2+130 km	780048.659 m	9210411.77 m

#### 4.1.2. *Objetivo específico 2: Realizar levantamiento topográfico y planos*

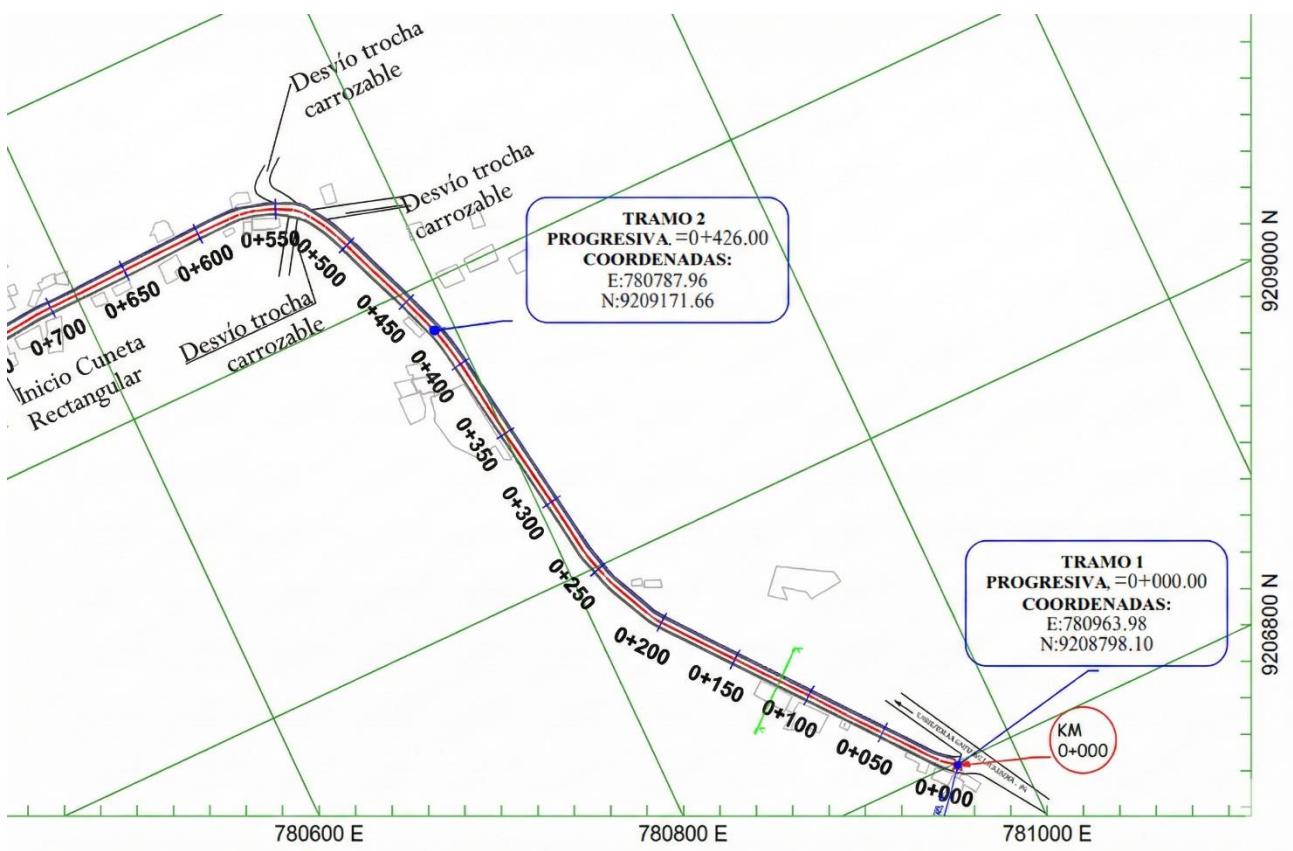
El levantamiento topográfico realizado el 05 de julio de 2025 permitió caracterizar con precisión la geometría de la carretera CA-1071 a lo largo de 2.13 km. Los resultados obtenidos mediante la estación total y el procesamiento en Civil 3D revelaron una calzada con un ancho promedio de 5.50 metros, dimensión que se mantuvo constante en los cinco tramos evaluados.

Al analizar este resultado bajo la normativa peruana vigente (DG-2018), un ancho de 5.50 m ubica a la vía dentro de las características típicas de una carretera de tercera clase perteneciente a una red vial vecinal, diseñada para un tránsito bajo a medio.

Finalmente, la elaboración de los planos de planta, perfil y secciones transversales ha permitido cuantificar con exactitud el área superficial deteriorada, limitar de manera precisa los tramos y caracterizarlos.

**Figura 74**

*Vista de plano General en Planta*



La Figura 74 muestra un recorte del Plano General en Planta (Ver anexo H) en el plano se observa la segmentación de la vía en los cinco tramos de evaluación definidos (T1 a T5), cada uno con una longitud de 426 metros. La geometría en planta revela un trazado sinuoso con múltiples curvas horizontales que se adaptan a la topografía del terreno, lo cual influye directamente en las condiciones de seguridad y comodidad de manejo evaluada

En el plano de ubicación (ver Anexo H) de la zona de estudio se observa que el proyecto se sitúa en el Centro Poblado de Tartar Chico, distrito de Los Baños del Inca, departamento de Cajamarca. Este plano permite visualizar la conectividad de la carretera CA-1071 con la red vial circundante y su entorno periurbano, validando la importancia de la vía como eje de integración local

En plano topográfico (ver Anexo H) se representan las curvas de nivel y el relieve del terreno natural, así como las tablas de puntos. Este levantamiento, realizado mediante estación total georreferenciada al sistema WGS-84, permitió identificar las pendientes longitudinales

El plano de secciones Típicas (Ver Anexo H) predominante en la carretera. Se constató un ancho de calzada constante de 5.50 metros a lo largo de los cinco tramos, con bombeo a la derecha, para facilitar el escurrimiento pluvial. Asimismo, se identificó la presencia de cunetas triangulares en el margen derecho y bermas de ancho variable.

#### ***4.1.3. Objetivo Específico 3, 4 y 5: Evaluación Funcional del pavimento***

En esta fase se procesaron los datos de campo correspondientes a los tres indicadores de desempeño seleccionados: Índice de Condición del Pavimento (PCI), Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y Profundidad Media de Textura (MTD).

La Tabla 37 presenta el resumen consolidado de los datos de entrada obtenidos para los cinco tramos de estudio, organizados por secciones progresivas. Esta matriz sirvió como base para el posterior análisis detallado y la modelación difusa.

**Tabla 37**

*Datos de entrada*

TRAMO	CRITERIO	UBICACIÓN	SECCIÓN								Promedio	Total	
			0-50 m	50-100 m	100-150 m	150-200 m	200-250 m	250-300 m	300-350 m	350-400 m			
Tramo 1	PCI (1-100)	Calzada		55	64	64	79	84	71		70	70	
	eIRI (m/km)	<i>Carril Der.</i>	2.50	2.10	1.60	1.40	1.27	1.60	1.40	1.63	2.00	1.72	3.155
		<i>Carril Izq.</i>	14.78	1.83	2.08	3.07	3.43	4.10	2.23	5.98	3.80	4.59	
	cIRI (m/km)	<i>Carril Der.</i>	2.20	4.25	3.47	4.57	1.57	2.97	2.50	3.37	3.70	3.18	3.245
		<i>Carril Izq.</i>	5.58	3.73	4.40	4.00	2.98	3.23	2.07	1.33	2.50	3.31	
	PT (mm)	<i>Carril Der.</i>	1.46				1.09					1.28	1.23
		<i>Carril Izq.</i>	1.12				1.23					1.18	
Tramo 2	PCI (1-100)	Calzada		72	60	68	75	46	56		63	63	
	eIRI (m/km)	<i>Carril Der.</i>	1.50	1.27	7.85	12.53	13.77	11.23	13.30	11.55	9.23	9.14	6.985
		<i>Carril Izq.</i>	12.06	7.40	2.50	3.48	1.98	6.13	2.68	3.25	4.03	4.83	
	cIRI (m/km)	<i>Carril Der.</i>	2.50	2.57	2.47	0.93	0.50	1.60	2.03	3.55	6.60	2.53	3.145
		<i>Carril Izq.</i>	5.22	3.34	3.20	1.90	2.35	6.20	4.65	4.78	2.23	3.76	
	PT (mm)	<i>Carril Der.</i>		1.06				1.24				1.15	1.06
		<i>Carril Izq.</i>		0.88				1.06				0.97	
Tramo 3	PCI (1-100)	Calzada	20.00	52.00	31.00	32.00	54.00	38.00			38	38	
	eIRI (m/km)	<i>Carril Der.</i>	8.62	7.83	8.33	9.08	8.20	11.57	13.65	13.20	7.80	9.81	7.79
		<i>Carril Izq.</i>	6.02	5.10	6.53	6.30	3.82	6.63	3.40	3.52	10.60	5.77	
	cIRI (m/km)	<i>Carril Der.</i>	3.03	3.70	4.27	3.70	4.63	6.80	6.80	3.63	5.40	4.66	4.07
		<i>Carril Izq.</i>	1.40	3.67	3.25	3.28	3.18	2.83	2.50	3.96	7.25	3.48	
	PT (mm)	<i>Carril Der.</i>	0.88				0.96					0.92	0.92
		<i>Carril Izq.</i>	0.81				1.02					0.92	
Tramo 4	PCI (1-100)	Calzada	69.00	69.00	61.00	59.00	54.00	63.00			63	63	
	eIRI (m/km)	<i>Carril Der.</i>	9.20	8.30	7.70	9.47	7.90	10.25	7.70	9.02	13.10	9.18	6.48
		<i>Carril Izq.</i>	5.52	3.42	2.23	2.63	3.58	4.34	4.74	2.03	5.55	3.78	
	cIRI (m/km)	<i>Carril Der.</i>	4.30	5.27	2.20	4.53	3.67	6.60	4.57	2.93	3.40	4.16	3.12
		<i>Carril Izq.</i>	1.14	2.66	2.80	3.20	2.48	1.90	1.30	1.97	1.15	2.07	
	PT (mm)	<i>Carril Der.</i>	1.07				1.26					1.17	1.06
		<i>Carril Izq.</i>	0.89				1.02					0.96	
Tramo 5	PCI (1-100)	Calzada		31.00	80.00	61.00	69.00	59.00	38.00		56	56	
	eIRI (m/km)	<i>Carril Der.</i>	10.02	7.55	7.63	7.53	11.92	14.48	11.88	11.43	8.95	10.15	7.5
		<i>Carril Izq.</i>	5.35	6.67	5.08	2.50	2.18	3.65	11.55	4.72	1.93	4.85	
	cIRI (m/km)	<i>Carril Der.</i>	7.47	2.67	3.30	3.87	2.03	1.30	3.37	3.87	2.70	3.40	3.46
		<i>Carril Izq.</i>	4.30	4.83	4.50	2.57	2.80	2.10	3.73	3.30		3.52	
	PT (mm)	<i>Carril Der.</i>		1.26					1.16			1.21	1.12
		<i>Carril Izq.</i>		1.05					1.02			1.04	

A continuación, se detalla el comportamiento de cada variable:

#### 4.1.3.1. Índice de Condición del Pavimento (PCI)

El análisis del PCI reveló una variabilidad significativa en la integridad del pavimento a lo largo de la vía.

**Tabla 38**

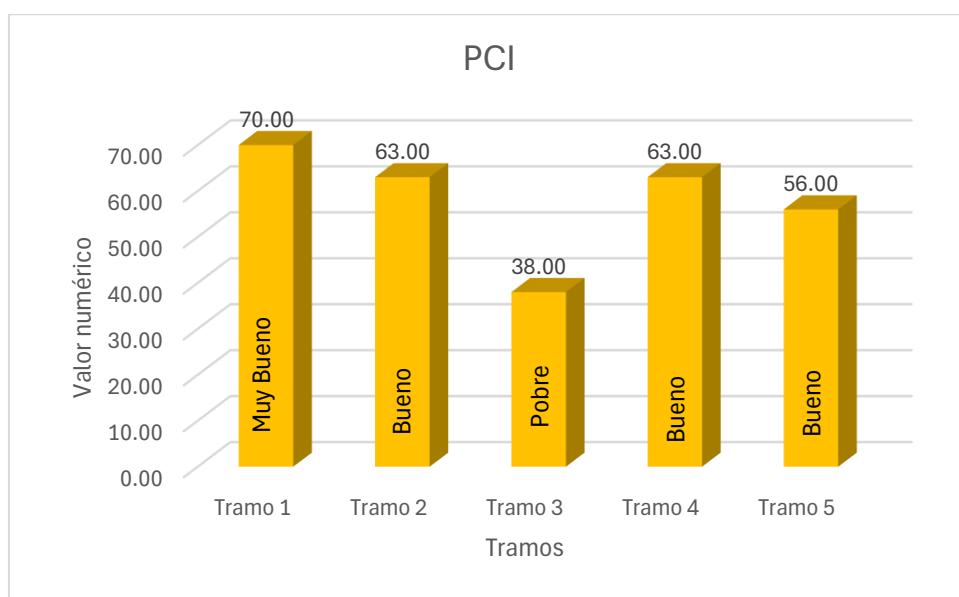
*Resumen de resultados de PCI*

Tramo	Área (m <sup>2</sup> )	Unidad de Muestra	Progresiva Inicial	Progresiva Final	m	VRC	PCI	Clasificación
1	275.0	1	00+050	00+100	6.6	45	55	Bueno
	275.0	2	00+100	00+150	7.1	36	64	Bueno
	275.0	3	00+150	00+200	7.1	36	64	Bueno
	275.0	4	00+200	00+250	8.7	21	79	Muy Bueno
	275.0	5	00+250	00+300	0.0	16	84	Muy Bueno
	275.0	6	00+350	00+400	0.0	29	71	Muy Bueno
	Promedio						<b>70</b>	<b>Muy Bueno</b>
2	275.0	1	00+476	00+526	7.8	28	72	Muy Bueno
	275.0	2	00+526	00+576	7.1	40	60	Bueno
	275.0	3	00+576	00+626	7.4	32	68	Bueno
	275.0	4	00+626	00+676	8.6	25	75	Muy Bueno
	275.0	5	00+676	00+726	6.0	54	46	Regular
	275.0	6	00+726	00+776	7.3	44	56	Bueno
	Promedio						<b>63</b>	<b>Bueno</b>
3	275.0	1	00+902	00+952	3.3	80	20	Muy Pobre
	275.0	2	00+952	01+002	7.1	48	52	Regular
	275.0	3	01+002	01+052	0.0	69	31	Pobre
	275.0	4	01+052	01+102	4.8	68	32	Pobre
	275.0	5	01+102	01+152	7.3	46	54	Regular
	275.0	6	01+152	01+202	4.7	62	38	Pobre
	Promedio						<b>38</b>	<b>Pobre</b>
4	275.0	1	01+328	01+378	7.5	31	69	Bueno
	275.0	2	01+378	01+428	0.0	31	69	Bueno
	275.0	3	01+428	01+478	7.0	39	61	Bueno
	275.0	4	01+478	01+528	6.6	41	59	Bueno
	275.0	5	01+528	01+578	7.0	46	54	Regular
	275.0	6	01+578	01+628	7.8	37	63	Bueno
	Promedio						<b>63</b>	<b>Bueno</b>
5	275.0	1	01+754	01+804	4.8	69	31	Pobre
	275.0	2	01+804	01+854	0.0	20	80	Muy Bueno
	275.0	3	01+854	01+904	7.1	39	61	Bueno
	275.0	4	01+904	01+954	0.0	31	69	Bueno
	275.0	5	01+954	02+004	6.8	41	59	Bueno
	275.0	6	02+004	02+054	4.7	62	38	Pobre
	Promedio						<b>56</b>	<b>Bueno</b>

La Tabla 38 resume los resultados de la inspección visual por tramo. Se observa que el Tramo 1 presenta la mejor condición estructural con un PCI promedio de 70 ("Muy Bueno"), registrando incluso una unidad de muestreo (UM-5) con valor de 84. En contraposición, el Tramo 3 exhibe el desempeño más crítico con un PCI promedio de 38 ("Pobre"), afectado severamente por la UM-1 que descendió hasta un PCI de 20 ("Muy Pobre").

**Figura 75**

*Grafico de comparación de resultados de PCI entre tramos*



La Figura 75 ilustra gráficamente esta variabilidad, destacando la caída abrupta en la condición del Tramo 3 con un estado “Pobre” en comparación con los Tramos 2, 4 y 5 mostraron condiciones de “Bueno”, con promedios de 63, 63 y 56 respectivamente, mientras que el Tramo 1 presentó un estado “Muy Bueno” (ver Tabla 34).

#### 4.1.3.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

Los resultados del perfil longitudinal se detallan en la Tabla 39, donde se desglosan los valores de IRI estimado (eIRI) e IRI calculado (cIRI) cada 50 metros.

**Tabla 39***Resumen de resultados de Valores IRI*

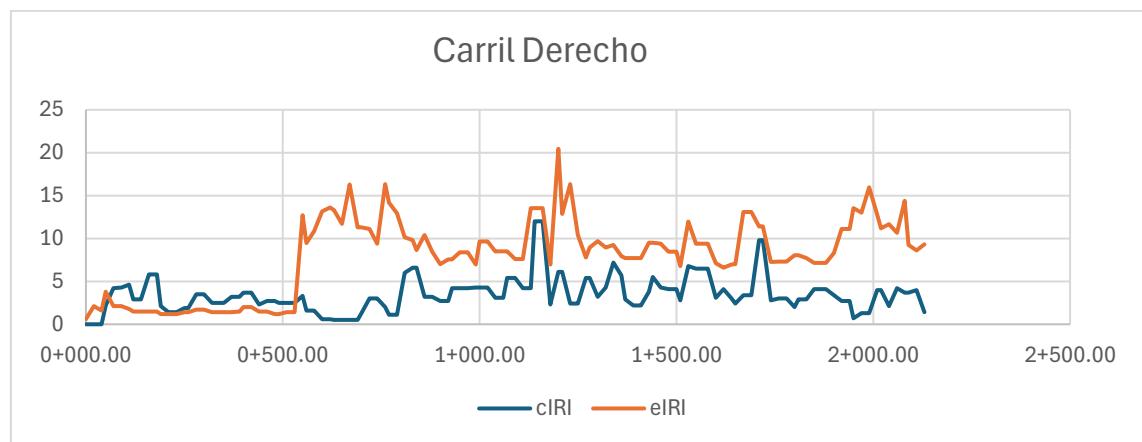
Tramos	Progresivas		cIRI		eIRI		Promedio (cIRI)
	Inicio	Final	Derecho	Izquierdo	Derecho	Izquierdo	
Tramo 1	0+000.00	0+050.00	2.20	5.58	2.50	14.78	
	0+050.00	0+100.00	4.25	3.73	2.10	1.83	
	0+100.00	0+150.00	3.47	4.40	1.60	2.08	
	0+150.00	0+200.00	4.57	4.00	1.40	3.07	
	0+200.00	0+250.00	1.57	2.98	1.27	3.43	3.25
	0+250.00	0+300.00	2.97	3.23	1.60	4.10	
	0+300.00	0+350.00	2.50	2.07	1.40	2.23	
	0+350.00	0+400.00	3.37	1.33	1.63	5.98	
	0+400.00	0+426.00	3.70	2.50	2.00	3.80	
	0+426.00	0+476.00	2.50	5.22	1.50	8.46	
Tramo 2	0+476.00	0+526.00	2.57	3.34	1.27	7.40	
	0+526.00	0+576.00	2.47	3.20	7.85	2.50	
	0+576.00	0+626.00	0.93	1.90	12.53	3.48	
	0+626.00	0+676.00	0.50	2.35	13.77	1.98	3.15
	0+676.00	0+726.00	1.60	6.20	11.23	6.13	
	0+726.00	0+776.00	2.03	4.65	13.30	2.68	
	0+776.00	0+826.00	3.55	4.78	11.55	3.25	
	0+826.00	0+852.00	6.60	2.23	9.23	4.03	
	0+852.00	0+902.00	3.03	1.40	8.62	6.02	
	0+902.00	0+952.00	3.70	3.67	7.83	5.10	
Tramo 3	0+952.00	1+002.00	4.27	3.25	8.33	6.53	
	1+002.00	1+052.00	3.70	3.28	9.08	6.30	
	1+052.00	1+102.00	4.63	3.18	8.20	3.82	4.07
	1+102.00	1+152.00	6.80	2.83	11.57	6.63	
	1+152.00	1+202.00	6.80	2.50	13.65	3.40	
	1+202.00	1+252.00	3.63	3.96	13.20	3.52	
	1+252.00	1+278.00	5.40	7.25	7.80	10.60	
	1+278.00	1+328.00	4.30	1.14	9.20	5.52	
	1+328.00	1+378.00	5.27	2.66	8.30	3.42	
	1+378.00	1+428.00	2.20	2.80	7.70	2.23	
Tramo 4	1+428.00	1+478.00	4.53	3.20	9.47	2.63	
	1+478.00	1+528.00	3.67	2.48	7.90	3.58	3.12
	1+528.00	1+578.00	6.60	1.90	10.25	4.34	
	1+578.00	1+628.00	4.57	1.30	7.70	4.74	
	1+628.00	1+678.00	2.93	1.97	9.02	2.03	
	1+678.00	1+704.00	3.40	1.15	13.10	5.55	
	1+704.00	1+754.00	7.47	4.30	10.02	5.35	
	1+754.00	1+804.00	2.67	4.83	7.55	6.67	3.46
	1+804.00	1+854.00	3.30	4.50	7.63	5.08	
	1+854.00	1+904.00	3.87	2.57	7.53	2.50	

1+904.00	1+954.00	2.03	2.80	11.92	2.18
1+954.00	2+004.00	1.30	2.10	14.48	3.65
2+004.00	2+054.00	3.37	3.73	11.88	11.55
2+054.00	2+104.00	3.87	3.30	11.43	4.72
2+104.00	2+130.00	2.70		8.95	1.93

De la Tabla 39 se consideraron únicamente los valores cIRI ya que éstos presentan los valores corregidos, además se observa que el Tramo 3 registra el mayor índice de rugosidad promedio (4.07 m/km), ubicándolo en el límite de la categoría "Regular".

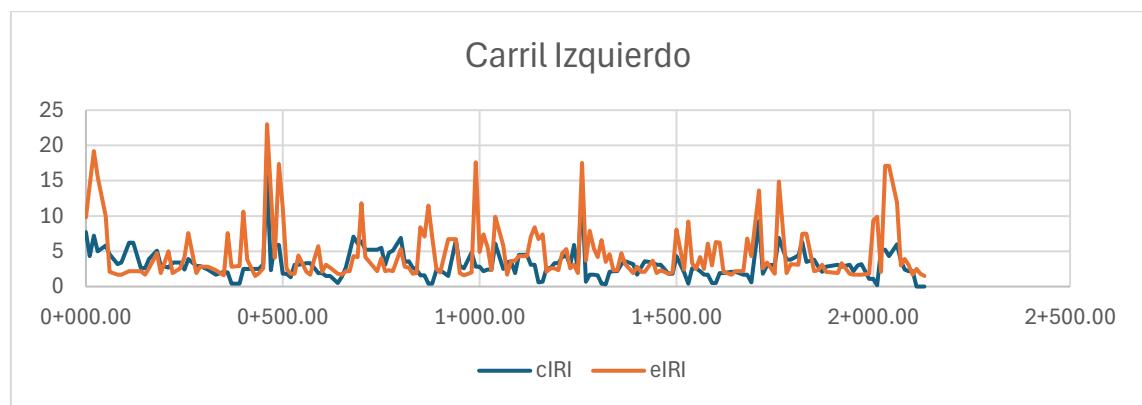
**Figura 76**

*Grafico de valores IRI del carril derecho.*



**Figura 77**

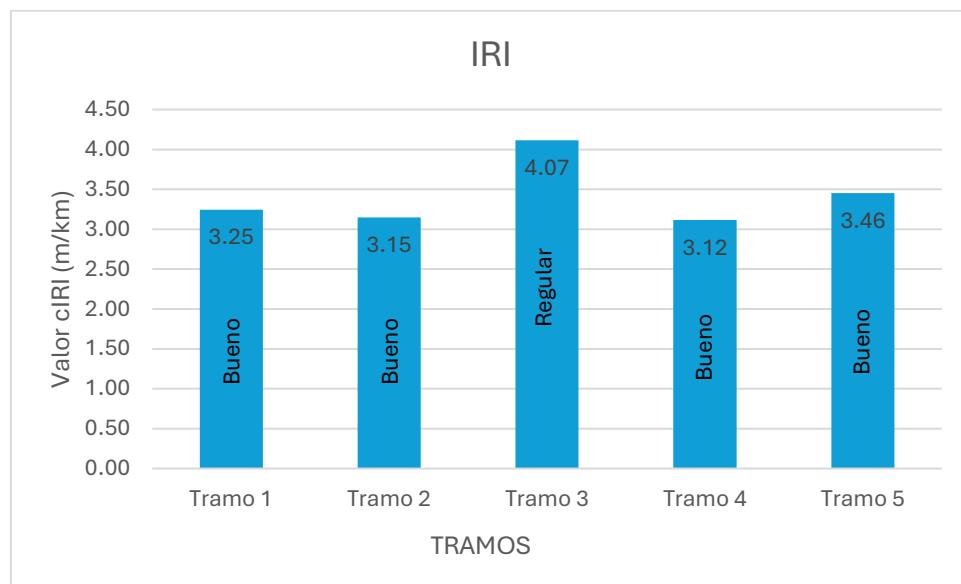
*Grafico de valores IRI del carril izquierdo.*



La Figura 76 y Figura 77 muestran la distribución de los valores IRI evidenciando que los valores más constantes son del cIRI mientras que los valores que presentan mayor oscilación son los valores eIRI.

**Figura 78**

*Gráfico de comparación de resultados de IRI entre tramos*



La Figura 78 ilustra la comparación de resultados del IRI, obteniendo en el Tramo 3 un IRI de 4.07 m/km correspondiente a “regular” (ver Tabla 34), para el Tramo 1, 2, 3 y 4 un valor de 3.25, 3.15, 3.12 y 3.46 respectivamente, lo cual corresponde a un estado de “bueno”. Lo que evidencia al Tramo 3 como el tramo en peor condición.

#### 4.1.3.3. Profundidad de Textura (MTD)

La evaluación de la macrotextura mediante el ensayo de Círculo de Arena se presenta en la Tabla 40 agrupándose según el volumen de muestra ensayado, el carril (izquierdo o derecho) y el tramo.

**Tabla 40**

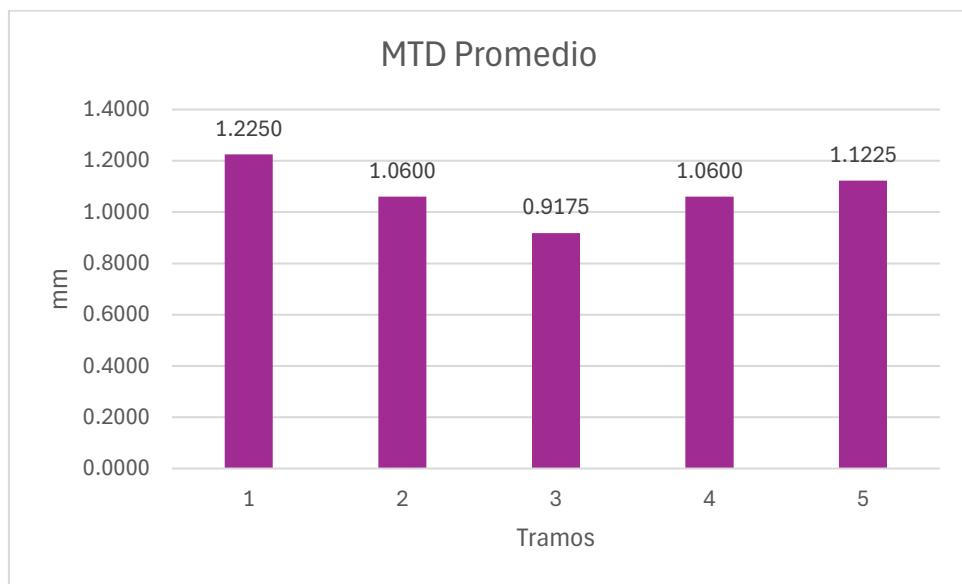
*Resumen de resultados de MTD por Tramo*

Tramo	Muestra	Ubicación	Carril	Diámetro (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	MTD	MTD carril	MTD Promedio	
1	780943.23 m E, 920883.03 m S	780826.13 m E, 9208993.05 m S	Izquierdo	24	50	1.1052	1.1200	1.2300	
				17	25	1.1014			
				10.5	10	1.1549			
			Derecho	21	50	1.4436	1.4600		
				14.5	25	1.5140			
				9.5	10	1.4108			
2	780943.23 m E, 920883.03 m S	780826.13 m E, 9208993.05 m S	Izquierdo	24	50	1.1052	1.2300		
				15.5	25	1.3249			
				10	10	1.2732			
			Derecho	25	50	1.0186	1.0900		
				17	25	1.1014			

			10.5	10	1.1549	
			27	50	0.8733	
		Izquierdo	19	25	0.8817	0.8800
			12	10	0.8842	
			25	50	1.0186	
		Derecho	17	25	1.1014	1.0600
			11	10	1.0523	
	2		24	50	1.1052	1.0600
		Izquierdo	17	25	1.1014	1.0600
			11.5	10	0.9628	
		Derecho	23	50	1.2034	
			16	25	1.2434	1.2400
			10	10	1.2732	
			28	50	0.8120	
		Izquierdo	20	25	0.7958	0.8100
			12.5	10	0.8149	
		Derecho	27	50	0.8733	
			19	25	0.8817	0.8800
			12	10	0.8842	
			25	50	1.0186	0.9200
		Izquierdo	18	25	0.9824	1.0200
			11	10	1.0523	
		Derecho	26	50	0.9417	
			18	25	0.9824	0.9600
			11.5	10	0.9628	
			26.5	50	0.9065	
		Izquierdo	19	25	0.8817	0.8900
			12	10	0.8842	
		Derecho	24.5	50	1.0606	
			17	25	1.1014	1.0700
			11	10	1.0523	
			25	50	1.0186	1.0600
		Izquierdo	18	25	0.9824	1.0200
			11	10	1.0523	
		Derecho	22.5	50	1.2575	
			16	25	1.2434	1.2600
			10	10	1.2732	
			24.5	50	1.0606	
		Izquierdo	17.5	25	1.0394	1.0500
			11	10	1.0523	
		Derecho	22.5	50	1.2575	
			16	25	1.2434	1.2600
			10	10	1.2732	
			25	50	1.0186	1.1200
		Izquierdo	18	25	0.9824	1.0200
			11	10	1.0523	
		Derecho	23.5	50	1.1528	
			16.5	25	1.1692	1.1600
			10.5	10	1.1549	

**Figura 79**

Grafico de valores MTD por Tramos.



La Tabla 40 y la Figura 79 indican que el tramo 1 obtuvo el mayor valor promedio (1.23 mm), indicando una excelente capacidad de drenaje superficial, el Tramo 3 registró el valor más bajo (0.955 mm), aunque se mantiene por encima del límite crítico de 0.4 mm, los Tramos 2, 4 y 5 mostraron valores intermedios de 1.06 mm, 1.065 mm y 1.125 mm respectivamente.

#### **4.1.4. Objetivo específico 6: Aplicación de FAHP para determinar pesos de criterios.**

La aplicación del Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP) permitió determinar la importancia relativa de cada criterio según el juicio de los cinco expertos consultados. Tras validar la consistencia de las matrices de comparación, con Razones de Consistencia  $RC < 10\%$ , (ver anexo B), se obtuvieron los siguientes pesos globales mediante la Agregación de Prioridades Individuales (AIP).

**Tabla 41**

*Pesos ponderados de criterios evaluadores.*

	Expertos					Media Geométrica	Media Geométrica Normalizada	%
	E1	E2	E3	E4	E5			
C1: Seguridad de Manejo (Profundidad de Textura)	0.542	0.400	0.201	0.497	0.309	0.367	0.398	39.82%
C2: Deterioro de Pavimento (PCI)	0.429	0.400	0.400	0.295	0.487	0.397	0.430	43.03%
C3: Comodidad de Manejo (IRI)	0.029	0.201	0.400	0.208	0.204	0.158	0.172	17.16%
						Sumatoria:	0.922	1.000
								100%

De la Tabla 41 se observa que:

- Deterioro del Pavimento (PCI): 43.03%. Fue considerado el criterio más influyente, lo que refleja la prioridad técnica de preservar la integridad física de la infraestructura.
- Seguridad de Manejo (MTD): 39.82%. Obtuvo una ponderación muy cercana al PCI, evidenciando que la seguridad del usuario es casi tan crítica como el estado estructural en la toma de decisiones.
- Comodidad de Manejo (IRI): 17.16%. Quedó relegado a un tercer lugar, indicando que, para vías vecinales de estas características, el confort es secundario frente a la estabilidad y seguridad de la vía.

Este perfil de ponderación ( $\text{PCI} \approx \text{MTD} > \text{IRI}$ ) define la sensibilidad del modelo final: el Índice de Evaluación Compuesta será muy reactivo a la presencia de fallas y problemas de adherencia, y menos sensible a la rugosidad.

#### **4.1.5. Objetivo específico 7: Aplicar FWA para obtener IEC**

La aplicación del método de Promedio Ponderado Difuso (FWA) permitió integrar variables con unidades y escalas heterogéneas (IRI en m/km, PCI de 0 a 100 y MTD en mm) en un diagnóstico único.

**Tabla 42***Valores de salida: Fusificados*

TRAMO	CRITERIO	VALOR CRISP	$\tilde{R}$
Tramo 1	PCI (1-100)	70	0, 0, 0.25
	IRI (m/km)	3.25	0, 0.25, 0.5
	PT (mm)	1.23	0, 0, 0.25
Tramo 2	PCI (1-100)	63	0, 0.25, 0.5
	IRI (m/km)	3.15	0, 0.25, 0.5
	PT (mm)	1.06	0, 0.25, 0.5
Tramo 3	PCI (1-100)	38	0.5, 0.75, 1
	IRI (m/km)	4.07	0.25, 0.5, 0.75
	PT (mm)	0.92	0, 0.25, 0.5
Tramo 4	PCI (1-100)	63	0, 0.25, 0.5
	IRI (m/km)	3.12	0, 0.25, 0.5
	PT (mm)	1.06	0, 0.25, 0.5
Tramo 5	PCI (1-100)	56	0, 0.25, 0.5
	IRI (m/km)	3.46	0, 0.25, 0.5
	PT (mm)	1.12	0, 0.25, 0.5

Se observa que la Tabla 42 presenta los valores de entrada (crisp) según los criterios evaluados para cada tramo y la matriz de valores fusificados ( $\tilde{R}_i$ ) para cada tramo, la cual constituye el insumo de entrada para el algoritmo de Promedio Ponderado Difuso (FWA).

**Tabla 43***Valores  $\tilde{Y}$  finales de Tramos*

Tramo	Valor $\tilde{Y}$
1	(0.00 0.04 0.29)
2	(0.00 0.25 0.50)
3	(0.26 0.51 0.76)
4	(0.00 0.25 0.50)
5	(0.00 0.25 0.50)

De la Tabla 43 se observa que: Mediante el algoritmo de Promedio Ponderado Difuso (FWA) se integraron los valores  $\tilde{R}_i$  y se obtuvieron los valores de  $\tilde{Y}$ , un número difuso triangular, representativo de cada tramo, donde se evidenció que el tramo 1 presenta los valores más bajos a comparación de los demás tramos. Lo que indica una

clasificación más cercana a “Muy Bueno”. Por el contrario el Tramo 3 presenta los valores más altos lo que indicó una clasificación más cercana al extremo opuesto “Muy malo”

**Tabla 44**

*Valores Y desfusificados de los Tramos*

Tramo	Y≈IEC
Tramo 1	0.11
Tramo 2	0.25
Tramo 3	0.51
Tramo 4	0.25
Tramo 5	0.25

La tabla 44 muestra los resultados finales después de desfusificar los valores de la tabla 43, el valor *Y* representa el Índice de Evaluación Compuesto (IEC), resultado de la aplicación de la metodología de FWA.

#### **4.1.6. Objetivo Específico 8: Comparación entre criterios**

**Tabla 45**

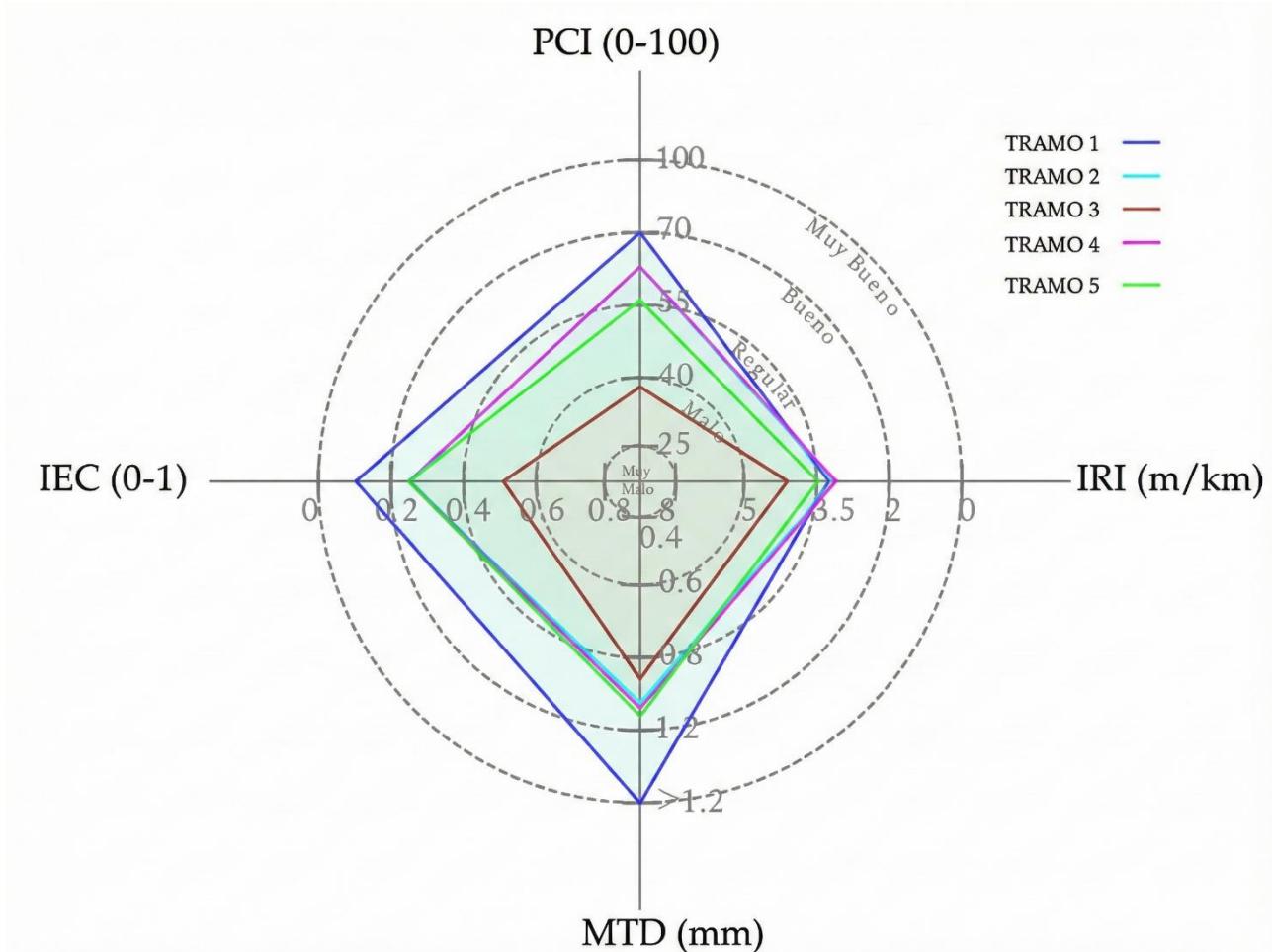
*Resultados de IRI, PCI, MTD y IEC*

Tramo	IRI (m/km)	PCI (0-100)	MTD (mm)	IEC (0-1)
Tramo 1	3.25	70	1.23	0.11
Tramo 2	3.15	63	1.06	0.25
Tramo 3	4.07	38	0.92	0.51
Tramo 4	3.12	63	1.06	0.25
Tramo 5	3.46	56	1.12	0.25

La Tabla 45 muestra los resultados de cada criterio evaluado (IRI, PCI, MTD) así como el Índice de Evaluación Compuesto (IEC) cada uno en su unidad de medición, se evidencia similitud en los valores del Tramo 2 y 4, y una diferencia más marcada con los valores del Tramo 3.

**Figura 80**

*Perfil multicriterio por tramo*



*Nota: La figura presenta un diagrama radial comparativo que integra las tres variables de entrada (PCI, IRI, MTD) y la variable de salida (IEC) para los cinco tramos evaluados.*

La Figura 80 demuestra la correlación directa entre los datos de entrada y salida.

No se observan casos anómalos, como podría ser un tramo con PCI muy bajo pero IEC muy alto. La forma del polígono final es geométricamente consistente con el promedio ponderado de sus vértices (Criterios), por lo que se confirma que el algoritmo FWA ha procesado la incertidumbre de manera lógica y coherente con la realidad observada en campo.

#### **4.1.7. Objetivo general: Estado del pavimento de los 5 tramos**

De acuerdo con la escala de clasificación establecida (ver Tabla 35), donde un valor menor indica mejor estado y un valor cercano a 1.0 indica falla total, los resultados finales se presentan en la Tabla 46:

**Tabla 46**

*Clasificación del estado de pavimento de los tramos en estudio.*

Tramo	IEC	Clasificación	Deterioro
Tramo 1	0.11	MUY BUENO	Insignificante
Tramo 2	0.25	BUENO	Leve
Tramo 3	0.51	REGULAR	Moderado
Tramo 4	0.25	BUENO	Leve
Tramo 5	0.25	BUENO	Leve

Se observa que: Los valores  $\tilde{Y}$  se desfusificaron y del resultado se obtuvo el índice de Evaluación Compuesto (IEC), el modelo identificó numéricamente al Tramo 3 (IEC = 0.51) como el sector más deteriorado, siendo el único clasificado como "Regular", acercándose al umbral de "Malo" (0.60). Por otro lado, los Tramos 2, 4 y 5 (IEC = 0.25) se confirmaron como sectores en aceptable, correspondiendo a una clasificación de "Bueno" y el Tramo 1 se estableció como el tramo en mejor estado al clasificarse como "Muy Bueno"

Para el tramo 3, su estado de deterioro se estableció en "moderado" lo que indica un daño evidente y que se encuentra en un punto de inflexión para tomar las medidas correctivas necesarias. Para el tramo 2, 4 y 5 que presentan un deterioro "Leve" indica una etapa temprana de deterioro, donde aparecen signos menores de fallas. Para el Tramo 1 que presenta un deterioro "Insignificante" indica un estado del pavimento casi excelente.

#### **4.2. Discusión de resultados según antecedentes teóricos.**

Los resultados obtenidos validan la utilidad de integrar métodos de Soft Computing para superar las limitaciones de las evaluaciones tradicionales aisladas. Al comparar los hallazgos con la literatura existente, se observan las siguientes coincidencias y divergencias:

- La ponderación obtenida, donde el PCI (43.03%) predomina sobre el IRI (17.16%), coincide con el enfoque de gestión en redes viales vecinales donde la integridad estructural es más crítica que el confort a altas velocidades. Esto contrasta ligeramente con estudios en autopistas de alta velocidad donde el IRI suele tener mayor peso, pero se alinea con lo expuesto por Smrudu et al. (2023), quienes destacan la eficacia del FAHP para priorizar tramos críticos basándose en múltiples indicadores de deterioro. Asimismo, Lemonakis et al. (2023) corroboran que el uso de FAHP permite incorporar eficazmente la incertidumbre del juicio experto en la evaluación funcional.
  
- La clasificación del Tramo 3 como "Regular" (IEC 0.51) es consistente con investigaciones locales. Briones Pompa (2025), en su evaluación de la Av. Independencia en Cajamarca, también encontró un estado "Regular" (PCI promedio de 46.5) debido a fallas por fatiga y bacheo. Encontrando la falla “Desprendimiento de agregados” muy recurrente en ambas investigaciones. Esto sugiere que las condiciones climáticas y de carga en la región de Cajamarca tienden a llevar a los pavimentos flexibles a un estado de servicio regular si no reciben mantenimiento oportuno.

- Antecedentes como el de Almonte Baca & Olivares García (2023) reportaron correlaciones moderadas entre PCI e IRI (Roadroid). En nuestro estudio, se reportaron del mismo modo similitudes en los resultados de ambos indicadores, al identificar al Tramo 3 con el PCI más bajo (38) y a la vez con el IRI más alto (4.07) lo que indican para ambos casos un mal estado del pavimento, además gracias al método FWA se permitió mitigar cualquier discrepancia individual al generar un índice único (IEC) que refleja la interrelación entre las tres variables, proporcionando un diagnóstico más robusto que el análisis individual.

#### **4.3. Contrastación de la hipótesis**

Para la hipótesis planteada "La integración y aplicación los métodos FAHP y FWA, determina mediante un índice que el estado de los 5 tramos de la carretera CA-1071 es regular".

Los resultados del Índice de Evaluación Compuesta (IEC) muestran una variabilidad en el estado de la vía a lo largo de los 2.13 km estudiados:

- Se confirmó que el Tramo 3 presenta un estado "Regular" (IEC 0.51).
- Sin embargo, los Tramos 2, 4 y 5 resultaron en estado "Bueno" (IEC 0.25) y el Tramo 1 en estado "Muy Bueno" (IEC 0.11).

Por lo que se concluye que **se descarta la hipótesis planteada**.

## **5. CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

- Se identificaron y delimitaron 5 tramos de estudio a lo largo de 2.13 km (ver Tabla 36) en el Centro Poblado de Tartar Chico, abarcando una longitud total de 2.13 km. Se caracterizó la vía como una carretera de red vecinal que conecta una zona periurbana, presentando un trazado sinuoso y sirviendo como eje principal de integración local.
- El levantamiento topográfico permitió determinar que la calzada mantiene un ancho promedio constante de 5.50 metros en los cinco tramos, lo cual, según la normativa DG-2018, la clasifica como una carretera de tercera clase. Se elaboraron planos: Plano de Ubicación, Topográfico, Plano General en planta, Plano en planta de Tramos, Plano de Plano de secciones típicas (ver anexo H)
- La evaluación del Índice de Condición del Pavimento – PCI, reveló una variabilidad significativa en el estado de conservación. El Tramo 1 presentó la mejor condición estructural con un PCI promedio de 70 ("Muy Bueno"). En contraste, el Tramo 3 fue identificado como el sector más crítico, obteniendo un PCI promedio de 38 ("Pobre"), afectado principalmente por fallas como piel de cocodrilo y baches, lo que indica una deficiencia estructural localizada. El tramo 2 con un PCI de 63, el Tramo 4 con un PCI de 63 y el Tramo 5 con un PCI igual a 56 presentaron una clasificación de "Bueno".
- La medición del Índice de Rugosidad Internacional – IRI mediante el aplicativo Roadroid mostró que la mayoría de los tramos (1, 2, 4 y 5) ofrecen una comodidad de viaje aceptable, con valores de IRI entre 3.12 m/km y 3.46 m/km (estado "Bueno"). Sin embargo, el Tramo 3 registró el mayor índice de rugosidad con 4.07 m/km, cayendo en la categoría de estado "Regular", lo que confirma la

correlación entre el deterioro superficial y la disminución del confort en este sector.

- La evaluación de la Profundidad de Textura – MTD, mediante el ensayo de círculo de arena indicaron que la macrotextura del pavimento es adecuada en toda la extensión de la vía, superando el umbral mínimo de seguridad de 0.4 mm. El Tramo 1 obtuvo el mejor desempeño con una profundidad media de textura de 1.23 mm, garantizando una excelente adherencia neumático-pavimento, mientras que el Tramo 3 presentó el valor más bajo (0.92 mm), aunque manteniéndose dentro de los rangos seguros. El tramo 2 y tramo 4 obtuvieron un valor de 1.06 mm, y el Tramo 5 un valor de 1.12 mm, lo que indica una buena adherencia.
- La aplicación del método FAHP procesó el juicio de cinco expertos, determinando que la integridad estructural y la seguridad son las prioridades técnicas para esta vía vecinal. Los pesos obtenidos fueron: Deterioro del Pavimento (PCI) con 43.03%, seguido muy de cerca por la Seguridad de Manejo (MTD) con 39.82%, y finalmente la Comodidad de Manejo (IRI) con 17.16%. Esto concluye que, para el contexto estudiado, la rugosidad es un factor secundario frente a la estabilidad física y la adherencia.
- El algoritmo FWA permitió integrar las tres variables heterogéneas en un único indicador: el Índice de Evaluación Compuesta (IEC). Resultando en la siguiente clasificación final del estado del pavimento:
  - Tramo 1: IEC 0.11.
  - Tramos 2, 4, 5: IEC 0.25
  - Tramo 3: IEC 0.51
- Al comparar el comportamiento de los indicadores individuales frente al Índice de Evaluación Compuesta (IEC), se evidenció una correlación directa y positiva

entre las variables (ver Tabla 45), validando la consistencia del modelo propuesto.

Específicamente, en el Tramo 3, los valores críticos de los indicadores tradicionales, el menor PCI con 38 y el mayor IRI con 4.07 m/km, convergieron hacia el valor más alto del IEC (0.51), identificándolo unánimemente como el sector más desfavorable. Sin embargo, la comparación también reveló la dominancia de la condición estructural sobre la funcional en el resultado final. Mientras que el IRI calificó a la mayoría de los tramos como “Buenos”, el IEC, influenciado por el peso del 43.03% asignado al PCI en el análisis FAHP, ajustó el diagnóstico global hacia un estado más conservador y realista. Esto demuestra que la evaluación aislada mediante un solo indicador (como el IRI o el MTD) podría generar sesgos, mientras que el IEC integra las discrepancias ofreciendo un diagnóstico holístico que prioriza la integridad física y la seguridad de la vía.

- Se aplicó e integró exitosamente un modelo de evaluación difuso IRI-PCI-MTD, logrando integrar las variables de comodidad, deterioro y seguridad, mediante el cual se logró evaluar el estado del pavimento de los 5 tramos de la carretera CA – 1071 (ver Tabla 46) señalando al Tramo 3 como el sector en peor estado con un Índice de Evaluación Compuesto (IEC) igual a 0.51 “Regular”, diferenciándolo claramente de los tramos en buen estado. El Tramo 2, Tramo 4, Tramo 5 obtuvieron la clasificación de “Bueno” con un IEC igual a 0.25, y el Tramo 1 obtuvo un IEC igual a 0.11 clasificándose como “Muy Bueno”.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda a la entidad gestora (Municipalidad Distrital de Los Baños del Inca) intervenir con carácter prioritario el Tramo 3. Dado su clasificación de "Regular" (IEC 0.51) y su PCI "Pobre", se sugiere aplicar un Mantenimiento Correctivo localizado (bacheo profundo y sellado) o una rehabilitación superficial para evitar que su deterioro progrese a un estado "Malo" o de falla estructural irreversible.
- Para los Tramos 2, 4 y 5 ("Bueno"), se recomienda implementar actividades de Mantenimiento Preventivo, como sellado de fisuras y limpieza de drenajes, para preservar su condición actual. Para el Tramo 1 ("Muy Bueno"), basta con un Mantenimiento Rutinario básico para asegurar la transitabilidad y limpieza de la calzada.
- Se recomienda que futuras investigaciones integren una cuarta variable: la Deflexión del Pavimento (medida mediante Viga Benkelman o FWD). Esto permitiría pasar de un índice de "estado superficial" a un índice de "salud integral", determinando si el deterioro observado en el PCI es solo epidérmico o si responde a una falla en la subrasante/base.
- Se recomienda replicar la metodología FAHP encuestando a expertos sobre Vías Urbanas o Carreteras Nacionales de Alto Tránsito para enriquecer el estado del arte sobre las prioridades de mantenimiento según el tipo de vía.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alaminos-Fernández, A. F. (2023). *Introducción a la teoría de conjuntos difusos y sus aplicaciones en investigación social e IA* (Limencop S.L., Ed.; 1a ed.). Centro Especial de Empleo Limencop.
- Ali, A., Heneash, U., Hussein, A., & Eskebi, M. (2022). Predicting Pavement Condition Index Using Fuzzy Logic Technique. *Infrastructures* 2022, Vol. 7, Page 91, 7(7), 91. <https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES7070091>
- Almonte Baca, J. E., & Olivares García, A. (2023). *Correlación entre los indicadores pci e iri del pavimento flexible en el tramo de la red vial 28b calca-Cusco 2022*. Universidad Andina del Cusco.
- ASTM D6433-20. (2020). *Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. <https://doi.org/10.1520/D6433-20>
- ASTM E965. (2006). *Método estandar de prueba para la medición de la profundidad de la macrotextura del pavimento utilizando una técnica volumétrica*. [https://es.slideshare.net/slideshow astm-e-965-96-traduzida-espanhol/102296824](https://es.slideshare.net/slideshow	astm-e-965-96-traduzida-espanhol/102296824)
- Bernal Romero, S., & Niño Sanabria, D. F. (2018). *MODELO MULTICRITERIO APlicado a la Toma de Decisiones Representables en Diagramas de ISHIKAWA*. UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Briones Pompa, L. F. (2025). Evaluación del estado actual del pavimento flexible en la Av. Independencia, tramo: Jr. Sucre – Av. Héroes del Cenepa, Cajamarca aplicando los métodos PCI y VIZIR [Universidad Nacional de Cajamarca]. En *Universidad Nacional de Cajamarca*. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/7772>
- CEDEX. (2023). *Círculo de Arena*. <https://www.cedex.es/centros-laboratorios/centro-de-estudios-del-transporte-cet/equipos-de-auscultacion/circulo-de-arena>
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649–655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- Chaturvedi, D. K. (2015). *Soft Computing Techniques and Their Applications*. 31–40. [https://doi.org/10.1007/978-981-287-973-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-287-973-8_2)
- CONREVIAL. (2000). *EVALUACIÓN Y DISEÑO PRELIMINAR PARA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS BITUMINOSOS: Vol. C*.
- Dong, W. M., & Wong, F. S. (1987). Fuzzy weighted averages and implementation of the extension principle. *Fuzzy Sets and Systems*, 21(2), 183–199. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(87\)90163-1](https://doi.org/10.1016/0165-0114(87)90163-1)
- Federal Highway Administration. (2008). *LTPP Manual for Profile Measurements and Processing*.

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpa/08056/chapt3.cfm>

Félix Paz Quiroz. (2025, julio 26). *66% de accidentes viales fatales se registraron en zonas rurales del país | News | ANDINA - Peru News Agency.*

<https://andina.pe/ingles/noticia-66-accidentes-viales-fatales-se-registraron-zonas-rurales-del-pais-1038724.aspx>

Forman, E., & Peniwati, K. (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 108(1), 165–169. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00244-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00244-0)

Forslöf, L., & Jones, H. (2015). Rroadroid: Continuous Road Condition Monitoring with Smart Phones. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9(4).  
<https://doi.org/10.17265/1934-7359/2015.04.012>

González Gutiérrez, Z. K., & Contreras Baca, G. A. (2022). *Correlación del IRI - PSI - PCI del pavimento flexible de la av. José María Arguedas del distrito de San Jerónimo - Andahuaylas 2022*. Universidad Continental.

Haußecker, H., & Tizhoosh, H. R. (2000). Fuzzy Image Processing. *Computer Vision and Applications*, 541–576. <https://doi.org/10.1016/B978-012379777-3/50017-0>

Kabir, G., & Akhtar Hasin, M. A. (2011). COMPARATIVE ANALYSIS OF AHP AND FUZZY AHP MODELS FOR MULTICRITERIA INVENTORY CLASSIFICATION. *International Journal of Fuzzy Logic Systems (IJFLS)*, 1(1).

Kurhe A.B, Satonkar S.S, Khanale P.B, & Shinde Ashok. (s/f). *Soft Computing and its Applications*. <http://www.bioinfo.in/contents.php?id=304>

Lemonakis, P., Kopelias, P., & Karlaftis, P. (2023). Introduction of a new index to assess pavement functional condition. *Environment, Development and Sustainability*, 27(2), 3265–3282. <https://doi.org/10.1007/S10668-023-04012-3/FIGURES/7>

Llosa Grau, J. (2006). *PROPIUESTA ALTERNATIVA PARA LA DISTRIBUCIÓN RACIONAL DEL PRESUPUESTO ANUAL MUNICIPAL PARA EL MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS PROYECTO PROFESIONAL PRESENTADO POR*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

MEF. (2015). *Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carretera* (Ministerio de Economía y Finanzas & Dirección General de Inversión Pública-DGIP, Eds.; 1a ed., Vol. 1). Servicios Gráficos JMD s.r.l.

MTC. (2014). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos Sección: Suelos y Pavimentos* (1a ed., Vol. 1). Servicios Gráficos Squadrito EIRL.  
[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/mtc%20normas/arch\\_pdf/man\\_7%20sggp-2014.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/mtc%20normas/arch_pdf/man_7%20sggp-2014.pdf?utm_source=chatgpt.com)

MTC. (2016a). *Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial* (1a ed.).

[www.mtc.gob.pe](http://www.mtc.gob.pe)

MTC. (2016b). *MANUAL DE INVENTARIOS VIALES*.

[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH\\_PDF/MAN\\_8%20IV-2014\\_2015.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_8%20IV-2014_2015.pdf)

MTC, P. Nacional. (2007). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA LA CONSERVACIÓN DE CARRETERAS*.

PIARC. (2023). *Ficha de términos | Terminología PIARC | resistencia al deslizamiento*.

[https://www.piarc.org/es/actividades/Diccionario-Vial-Terminologia-Transporte-Carretera/ficha-termino/92989-es-resistencia%20al%20deslizamiento.htm?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.piarc.org/es/actividades/Diccionario-Vial-Terminologia-Transporte-Carretera/ficha-termino/92989-es-resistencia%20al%20deslizamiento.htm?utm_source=chatgpt.com)

Ramirez Castro, B. S. (2017). *CÁLCULO DEL IRI MEDIANTE ACELERÓMETRO DE SMARTPHONE EN EL TRAMO HUARMEY-CASMA DE LA CARRETERA PANAMERICANA NORTE*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ .

Roadroid. (2024). *Road Surveying using Smartphones. App version Pro 3 Road Data Management system version >2.6.20 User Guide for Roadroid Pro 3-January 2024*.

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)

Sanchez Bautista, K. L. (2022). *EVALUACIÓN DE LAS FALLAS ESTRUCTURALES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA AVENIDA CENTENARIO EN EL DISTRITO DE SANTA MARÍA-2021*. UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN.

Sayers, M. W., Gillespie, T. D., Paterson, W. D. O, World, T., & Washington, B. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements* (46).

Shahin, M. Y. (2005). *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots* (Chapman and Hall, Ed.; 2a ed.). Kluwer Academic Publishers.  
<https://news.ncac.mn/uploads/bookSubject/2022-02/62184b50d1082.pdf>

Singh, A. P., Sharma, A., Mishra, R., Wagle, M., & Sarkar, A. K. (2018). Pavement condition assessment using soft computing techniques. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(6), 564–581.  
<https://doi.org/10.1016/J.IJPRT.2017.12.006>

Smrudu, T. K., Sanjay Kumar, V. S., & Akkara, J. (2023). Pavement Condition Assessment Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 18(1), 187–198.  
<https://doi.org/10.1007/S42947-023-00335-6/METRICS>

- Steven M, K., & Michael W, Sayers. (2025). *The Little Book of Profiling* (2a ed.).  
University of Michigan Transportation Research Institute.  
<https://doi.org/10.7302/25430>
- Tingal Limay, H. (2021). Análisis de índice de rugosidad internacional (IRI) de la superficie del pavimento flexible de la vía Cajamarca - Baños del Inca, utilizando el rugosímetro de Merlin. [Universidad Nacional de Cajamarca]. En *Universidad Nacional de Cajamarca*. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4366>
- Transportation Research Board, & National Academies of Sciences, E. and M. (2009). Guide for Pavement Friction. En The National Academies Press (Ed.), *Guide for Pavement Friction*. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/23038>
- Vásquez Varela, L. R. (2002). *PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI) PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS Y DE CONCRETO EN CARRETERAS*.
- Vásquez Varela, L. R. (2024). Índice de Condición del Pavimento para pavimentos asfálticos, de concreto de cemento Portland y de adoquines en vías y estacionamientos; e índice de condición de carreteras no pavimentadas. En *Manual de PCI y URCI para calles y carreteras* (1a ed.).  
[https://www.academia.edu/113022888/Manual\\_de\\_PCI\\_y\\_URCI\\_para\\_calles\\_y\\_carreteras](https://www.academia.edu/113022888/Manual_de_PCI_y_URCI_para_calles_y_carreteras)
- Vistrain, S. A. (2024). *El Método AHP Difuso: Una Herramienta Avanzada para la Toma de Decisiones Complejas en un Mundo Incierto*.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.  
[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

## **ANEXOS**

## ANEXO A: MATRICES DE COMPARACIÓN DE EXPERTOS-FAHP

**Tabla 47**

*Matriz de comparación pareada: Experto 1*

<b>CRITERIOS DE EVALUACIÓN</b>			
	Seguridad de Manejo (MTD)	Deterioro de Pavimento (PCI)	Comodidad de Manejo (IR)
Seguridad de Manejo (MTD)	(1, 1, 1)	(1,1,3)	(3,5,7)
Deterioro de Pavimento (PCI)	(1/3,1,1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Comodidad de Manejo (IRI)	(1/7,1/5,1/3)	(1/5,1/3,1)	(1, 1, 1)

---

Experto N°1

---

Ing. Richard Gerard Vásquez Fernández

**Tabla 48**

*Matriz de comparación pareada: Experto 2*

<b>CRITERIOS DE EVALUACIÓN</b>			
	Seguridad de Manejo (MTD)	Deterioro de Pavimento (PCI)	Comodidad de Manejo (IR)
Seguridad de Manejo (MTD)	(1, 1, 1)	(1,1,3)	(1, 3, 5)
Deterioro de Pavimento (PCI)	(1/3,1,1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Comodidad de Manejo (IRI)	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)	(1, 1, 1)

---

Experto N°2

---

Ing. Ana Liliana Murrugarra Sanchez

**Tabla 49**

*Matriz de comparación pareada: Experto 3*

<b>CRITERIOS DE EVALUACIÓN</b>			
	Seguridad de Manejo (MTD)	Deterioro de Pavimento (PCI)	Comodidad de Manejo (IR)
Seguridad de Manejo (MTD)	(1, 1, 1)	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)
Deterioro de Pavimento (PCI)	(1, 3, 5)	(1, 1, 1)	(1,1,3)
Comodidad de Manejo (IRI)	(1, 3, 5)	(1/3,1,1)	(1, 1, 1)

---

Experto N°3

---

Ing. Kevin Geampierre Manco Castillo

**Tabla 50***Matriz de comparación pareada: Experto 4*

CRITERIOS DE EVALUACIÓN			
	Seguridad de Manejo (MTD)	Deterioro de Pavimento (PCI)	Comodidad de Manejo (IRI)
Seguridad de Manejo (MTD)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)
Deterioro de Pavimento (PCI)	(1/5,1/3,1)	(1, 1, 1)	(1,1,3)
Comodidad de Manejo (IRI)	(1/5,1/3,1)	(1/3,1,1)	(1, 1, 1)

Experto N°4  
Ing. Jaime Antonio Villacorte Delgado

**Tabla 51***Matriz de comparación pareada: Experto 5*

CRITERIOS DE EVALUACIÓN			
	Seguridad de Manejo (MTD)	Deterioro de Pavimento (PCI)	Comodidad de Manejo (IRI)
Seguridad de Manejo (MTD)	(1, 1, 1)	(1/5,1/3,1)	(1,1,3)
Deterioro de Pavimento (PCI)	(1, 3, 5)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Comodidad de Manejo (IRI)	(1/3,1,1)	(1/5,1/3,1)	(1, 1, 1)

Experto N°5  
Ing. Eddy Alvarado Rafael

## ANEXO B: CONSISTENCIA DE MATRICES DE COMPARACIÓN PAREADA

Experto N°1	Ing. Richard Gerard Vásquez Fernandez	RC=	2.51%
-------------	---------------------------------------	-----	-------

1. Matriz de comparación pareada según escala triangular difusa

COMPARACIÓN DE CRITERIOS GENERALES	Seguridad de Manejo (MTD)	Deterioro de Pavimento (PCI)	Comodidad de Manejo (IRI)
Seguridad de Manejo (MTD)	1, 1, 1	1,1,3	3,5,7
Deterioro de Pavimento (PCI)	1/3,1,1	1, 1, 1	1, 3, 5
Comodidad de Manejo (IRI)	1/7,1/5,1/3	1/5,1/3,1	1, 1, 1

2. Matriz de comparación pareada, según número difuso

A:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

Suma de columnas:      2.20      2.33      9.00

3. Normalización de Matriz

$$\begin{pmatrix} 0.4545 & 0.4286 & 0.5556 \\ 0.4545 & 0.4286 & 0.3333 \\ 0.0909 & 0.1429 & 0.1111 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 0.4796 \\ 0.4055 \\ 0.1150 \end{pmatrix} \text{ Promedio de filas (w):}$$

4. Vector fila total:

$$\text{Matriz original (A): } \begin{pmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.4796 \\ 0.4055 \\ 0.1150 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.4598 \\ 1.2299 \\ 0.3460 \end{pmatrix} \text{ Prom. De filas (w)}$$

5. Vector cociente

$$\begin{pmatrix} \text{vec. Fila total (A*w)} \\ 1.4598 \\ 1.2299 \\ 0.3460 \end{pmatrix} \div \begin{pmatrix} \text{vec. Promedio (w)} \\ 0.4796 \\ 0.4055 \\ 0.1150 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Vector cociente} \\ 3.044 \\ 3.033 \\ 3.010 \end{pmatrix}$$

6. Valor propio máximo

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(A * w)_i}{w_i} \right) \dots \text{Ec. 4}$$

$\lambda_{max} = 3.029$

6. Índice de Consistencia

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \dots \text{Ec. 5}$$

$$IC = 0.01456$$

7. Índice de consistencia aleatorio

$$ICA = 0.58 \dots \text{Según tabla 5}$$

8. Razón de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{ICA} \dots \text{Ec. 6}$$

$$RC = 2.51\% < 10\%$$

1. Matriz de comparación pareada según escala triangular difusa

COMPARACIÓN DE CRITERIOS GENERALES	Seguridad de Manejo (MTD)	Deterioro de Pavimento (PCI)	Comodidad de Manejo (IRI)
Seguridad de Manejo (MTD)	1, 1, 1	1,1,3	1, 3, 5
Deterioro de Pavimento (PCI)	1/3,1,1	1, 1, 1	1, 3, 5
Comodidad de Manejo (IRI)	1/5,1/3,1	1/5,1/3,1	1, 1, 1

2. Matriz de comparación pareada, según número difuso

$$A: \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

Suma de columnas:      2.33      2.33      7.00

3. Normalización de Matriz

$$\begin{pmatrix} 0.4286 & 0.4286 & 0.4286 \\ 0.4286 & 0.4286 & 0.4286 \\ 0.1429 & 0.1429 & 0.1429 \end{pmatrix} \longrightarrow \text{Promedio de filas (w):} \begin{pmatrix} 0.4286 \\ 0.4286 \\ 0.1429 \end{pmatrix}$$

4. Vector fila total:

$$\text{Matriz original (A):} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \times \text{Prom. De filas (w)} \begin{pmatrix} 0.4286 \\ 0.4286 \\ 0.1429 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.2857 \\ 1.2857 \\ 0.4286 \end{pmatrix}$$

5. Vector cociente

$$\text{vec. Fila total (A*w)} \begin{pmatrix} 1.2857 \\ 1.2857 \\ 0.4286 \end{pmatrix} \div \text{vec. Promedio (w)} \begin{pmatrix} 0.4286 \\ 0.4286 \\ 0.1429 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.000 \\ 3.000 \\ 3.000 \end{pmatrix}$$

6. Valor propio máximo

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(A * w)_i}{w_i} \right) \dots \text{Ec. 4}$$

$$\lambda_{max} = 3.000$$

6. Índice de Consistencia

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \dots \text{Ec. 5}$$

$$IC = 0.00000$$

7. Índice de consistencia aleatoria

$$ICA = 0.58 \dots \text{Según tabla 5}$$

8. Razón de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{ICA} \dots \text{Ec. 6}$$

$$RC = 0.00\% < 10\%$$

1. Matriz de comparación pareada según escala triangular difusa

<b>COMPARACIÓN DE CRITERIOS GENERALES</b>	Seguridad de Manejo (MTD)	Deterioro de Pavimento (PCI)	Comodidad de Manejo (IRI)
Seguridad de Manejo (MTD)	1, 1, 1	1/5, 1/3, 1	1/5, 1/3, 1
Deterioro de Pavimento (PCI)	1, 3, 5	1, 1, 1	1, 1, 3
Comodidad de Manejo (IRI)	1, 3, 5	1/3, 1, 1	1, 1, 1

2. Matriz de comparación pareada, según número difuso

$$A: \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Suma de columnas:  $7 \quad 2.33333333 \quad 2.33$

3. Normalización de Matriz

$$\begin{pmatrix} 0.1429 & 0.1429 & 0.1429 \\ 0.4286 & 0.4286 & 0.4286 \\ 0.4286 & 0.4286 & 0.4286 \end{pmatrix} \longrightarrow \text{Promedio de filas (w):} \begin{pmatrix} 0.1429 \\ 0.4286 \\ 0.4286 \end{pmatrix}$$

4. Vector fila total:

$$\text{Matriz original (A):} \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{pmatrix} \times \text{Prom. De filas (w)} \begin{pmatrix} 0.1429 \\ 0.4286 \\ 0.4286 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4286 \\ 1.2857 \\ 1.2857 \end{pmatrix}$$

5. Vector cociente

$$\text{vec. Fila total (A*w)} \begin{pmatrix} 0.4286 \\ 1.2857 \\ 1.2857 \end{pmatrix} \div \text{vec. Promedio (w)} \begin{pmatrix} 0.1429 \\ 0.4286 \\ 0.4286 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.000 \\ 3.000 \\ 3.000 \end{pmatrix}$$

6. Valor propio máximo

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(A * w)_i}{w_i} \right) \dots \text{Ec. 4}$$

$$\lambda_{max} = 3.000$$

6. Índice de Consistencia

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \dots \text{Ec. 5}$$

$$IC = 0.00000$$

7. Índice de consistencia aleatoria

$$ICA = 0.58 \dots \text{Según tabla 5}$$

8. Razón de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{ICA} \dots \text{Ec. 6}$$

$$RC = 0.00\% < 10\%$$

1. Matriz de comparación pareada según escala triangular difusa

COMPARACIÓN DE CRITERIOS GENERALES	Seguridad de Manejo (MTD)	Deterioro de Pavimento (PCI)	Comodidad de Manejo (IRI)
Seguridad de Manejo (MTD)	1, 1, 1	1, 3, 5	1, 3, 5
Deterioro de Pavimento (PCI)	1/5, 1/3, 1	1, 1, 1	1, 1, 3
Comodidad de Manejo (IRI)	1/5, 1/3, 1	1/3, 1, 1	1, 1, 1

2. Matriz de comparación pareada, según número difuso

A:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Suma de columnas: 1 2/3      5      5.00

3. Normalización de Matriz

$$\begin{pmatrix} 0.6000 & 0.6000 & 0.6000 \\ 0.2000 & 0.2000 & 0.2000 \\ 0.2000 & 0.2000 & 0.2000 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 0.6000 \\ 0.2000 \\ 0.2000 \end{pmatrix}$$

4. Vector fila total:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.6000 \\ 0.2000 \\ 0.2000 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.8000 \\ 0.6000 \\ 0.6000 \end{pmatrix}$$

5. Vector cociente

$$\begin{pmatrix} 1.8000 \\ 0.6000 \\ 0.6000 \end{pmatrix} \div \begin{pmatrix} 0.6000 \\ 0.2000 \\ 0.2000 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.000 \\ 3.000 \\ 3.000 \end{pmatrix}$$

6. Valor propio máximo

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(A * w)_i}{w_i} \right) \dots \text{Ec. 4}$$

$$\lambda_{max} = 3.000$$

6. Índice de Consistencia

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \dots \text{Ec. 5}$$

$$IC = 0.00000$$

7. Índice de consistencia aleatoria

$$ICA = 0.58 \dots \text{Según tabla 5}$$

8. Razón de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{ICA} \dots \text{Ec. 6}$$

$$RC = 0.00\% < 10\%$$

1. Matriz de comparación pareada según escala triangular difusa

COMPARACIÓN DE CRITERIOS GENERALES	Seguridad de Manejo (MTD)	Deterioro de Pavimento (PCI)	Comodidad de Manejo (IRI)
Seguridad de Manejo (MTD)	1, 1, 1	1/5, 1/3, 1	1, 1, 3
Deterioro de Pavimento (PCI)	1, 3, 5	1, 1, 1	1, 3, 5
Comodidad de Manejo (IRI)	1/3, 1, 1	1/5, 1/3, 1	1, 1, 1

2. Matriz de comparación pareada, según número difuso

A:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1 \\ 3 & 1 & 3 \\ 1 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

Suma de columnas: 5 1.66666667 5.00

3. Normalización de Matriz

$$\begin{pmatrix} 0.2000 & 0.2000 & 0.2000 \\ 0.6000 & 0.6000 & 0.6000 \\ 0.2000 & 0.2000 & 0.2000 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 0.2000 \\ 0.6000 \\ 0.2000 \end{pmatrix}$$

4. Vector fila total:

$$\text{Matriz original (A):} \quad \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1 \\ 3 & 1 & 3 \\ 1 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \quad \times \quad \begin{pmatrix} 0.2000 \\ 0.6000 \\ 0.2000 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.6000 \\ 1.8000 \\ 0.6000 \end{pmatrix}$$

5. Vector cociente

$$\text{vec. Fila total (A*w)} \quad \div \quad \text{vec. Promedio (w)} = \begin{pmatrix} 3.000 \\ 3.000 \\ 3.000 \end{pmatrix}$$

6. Valor propio máximo

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(A * w)_i}{w_i} \right) \dots \text{Ec. 4}$$

$$\lambda_{max} = 3.000$$

6. Índice de Consistencia

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \dots \text{Ec. 5}$$

$$IC = 0.00000$$

7. Índice de consistencia aleatorio

$$ICA = 0.58 \dots \text{Según tabla 5}$$

8. Razón de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{ICA} \dots \text{Ec. 6}$$

$$RC = 0.00\% < 10\%$$

## ANEXO C: VECTORES DE PESOS NORMALIZADOS

Experto N°1	Ing. Richard Gerard Vásquez Fernandez	RC=	5.80%
-------------	---------------------------------------	-----	-------

1. Matriz de comparación pareada

COMPARACIÓN DE CRITERIOS GENERALES	Seguridad de Manejo (MTD)			Deterioro de Pavimento (PCI)			Comodidad de Manejo (IRI)		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Seguridad de Manejo (MTD)	{ 1.00	1.00	1.00 }	{ 1.00	1.00	3.00 }	{ 3.00	5.00	7.00 }
Deterioro de Pavimento (PCI)	{ 0.33	1.00	1.00 }	{ 1.00	1.00	1.00 }	{ 1.00	3.00	5.00 }
Comodidad de Manejo (IRI)	{ 0.14	0.20	0.33 }	{ 0.20	0.33	1.00 }	{ 1.00	1.00	1.00 }

2. Suma de filas

$$\begin{array}{ccc}
 l & m & u \\
 \text{C1: } & \{ 5.00 & 7.00 & 11.00 \} \\
 \text{C2: } & \{ 2.33 & 5.00 & 7.00 \} \\
 \text{C3: } & \{ 1.34 & 1.53 & 2.33 \} \\
 \\ 
 \hline
 & \underline{\textbf{8.68}} & \underline{\textbf{13.53}} & \underline{\textbf{20.33}}
 \end{array}$$

3. Cálculo del valor de la Extensión sintética difusa con respecto al objeto i

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j * \left[ \sum_{i=t}^n \sum_{j=t}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \dots \dots \dots (7)$$

	<i>l<sub>i</sub></i>	<i>m<sub>i</sub></i>	<i>u<sub>i</sub></i>	<i>i</i>
C1:	{ 0.246	0.517	1.268 }	1
C2:	{ 0.115	0.369	0.807 }	2
C3:	{ 0.066	0.113	0.269 }	3

4. Cálculo de Grado de Posibilidad

$$V(S_1 \geq S_2) = \begin{cases} 1, si \ m_1 \geq m_2 \\ 0, si \ l_2 \geq u_1 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, en \ otro \ caso \end{cases} \dots \dots \dots (8)$$

Se calcula para los 4 criterios:

			Val. Min	Normalización
C1:	$\begin{cases} V(S1 \geq S2) \\ V(S1 \geq S3) \end{cases}$	=	1	
		=	1	1.00
				0.542
C2:	$\begin{cases} V(S2 \geq S1) \\ V(S2 \geq S3) \end{cases}$	=	0.79	
		=	1.00	0.79
				0.429
C3:	$\begin{cases} V(S3 \geq S1) \\ V(S3 \geq S2) \end{cases}$	=	0.05	
		=	0.38	0.05
				0.029
				<b>1.85</b>

5. Cálculo de pesos difusos de criterios

$$\begin{array}{ll}
 \text{Seguridad de Manejo (MTD :} & 54.19\% \\
 \text{Deterioro de Pavimento (PC :} & 42.89\% \\
 \text{Comodidad de Manejo (IRI :} & 2.92\%
 \end{array}$$

100.00%

6. Vector de Pesos normalizados

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \dots \dots \dots (3)$$

$$W = \begin{pmatrix} 0.542 & 0.429 & 0.029 \end{pmatrix}$$

## 1. Matriz de comparación pareada

COMPARACIÓN DE CRITERIOS GENERALES	Seguridad de Manejo (MTD)			Deterioro de Pavimento (PCI)			Comodidad de Manejo (IRI)		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Seguridad de Manejo (MTD)	{ 1.00	1.00	1.00 }	{ 1.00	1.00	3.00 }	{ 1.00	3.00	5.00 }
Deterioro de Pavimento (PCI)	{ 0.33	1.00	1.00 }	{ 1.00	1.00	1.00 }	{ 1.00	3.00	5.00 }
Comodidad de Manejo (IRI)	{ 0.20	0.33	1.00 }	{ 0.20	0.33	1.00 }	{ 1.00	1.00	1.00 }

## 2. Suma de filas

$$\begin{array}{ccc}
 l & m & u \\
 \text{C1: } & [ 3 & 5 & 9 ] \\
 \text{C2: } & [ 2/3 & 5 & 7 ] \\
 \text{C3: } & [ 1/2 & 1/2 & 3 ] \\
 \\ 
 \hline
 & \mathbf{6.73} & \mathbf{11.67} & \mathbf{19.00}
 \end{array}$$

3. Cálculo del valor de la Extensión sintética difusa con respecto al objeto *i*

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j * \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \dots \dots \dots (7)$$

C1:	[ 3.00      5.00      9.00 ]	[ 0.05      0.09      0.15 ]	[ 0.158      0.429      1.337 ]	i 1
C2:	[ 2.33      5.00      7.00 ]	×	[ 0.123      0.429      1.040 ]	2
C3:	[ 1.40      1.67      3.00 ]	[ 0.05      0.09      0.15 ]	[ 0.074      0.143      0.446 ]	3

## 4. Cálculo de Grado de Posibilidad

$$V(S_1 \geq S_2) = \begin{cases} 1, si \quad m_1 \geq m_2 \\ 0, si \quad l_2 \geq u_1 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, en \quad otro \quad caso \end{cases} \dots \dots \dots (8)$$

Se calcula para los 4 criterios:

			Val. Min	Normalización
C1:	V(S1≥S2)	=	1	
	V(S1≥S3)	=	1.00	0.400
C2:	V(S2≥S1)	=	1.00	
	V(S2≥S3)	=	1.00	0.400
C3:	V(S3≥S1)	=	0.50	
	V(S3≥S2)	=	0.53	0.201
<b>2.50</b>				

## 5. Cálculo de pesos difusos de criterios

Seguridad de Manejo (MTD : 39.97%)

Deterioro de Pavimento (PCI : 39.97%)

Comodidad de Manejo (IRI : 20.05%)

100.00%

## 6. Vector de Pesos normalizados

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \dots \dots \dots (3)$$

W= [ 0.400      0.400      0.201 ]

## 1. Matriz de comparación pareada

COMPARACIÓN DE CRITERIOS GENERALES	Seguridad de Manejo (MTD)			Deterioro de Pavimento (PCI)			Comodidad de Manejo (IRI)		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Seguridad de Manejo (MTD)	{ 1	1	1 }	{ 1/5	1/3	1 }	{ 1/5	1/3	1 }
Deterioro de Pavimento (PCI)	{ 1	3	5 }	{ 1	1	1 }	{ 1	1	3 }
Comodidad de Manejo (IRI)	{ 1	3	5 }	{ 1/3	1	1 }	{ 1	1	1 }

## 2. Suma de filas

$$\begin{array}{ccc}
 & l & m & u \\
 \text{C1:} & [ 12/5 & 12/3 & 3 ] \\
 \text{C2:} & [ 3 & 5 & 9 ] \\
 \text{C3:} & [ 2 1/3 & 5 & 7 ] \\
 \\ 
 \hline
 & \mathbf{6.73} & \mathbf{11.67} & \mathbf{19.00}
 \end{array}$$

3. Cálculo del valor de la Extensión sintética difusa con respecto al objeto *i*

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j * \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \dots \dots \dots (7)$$

C1:	[ 1.40      1.67      3.00 ]	×	[ 0.05      0.09      0.15 ]	=	$\frac{l_i}{[ 0.074 \quad 0.143 \quad 0.446 ]}$	<i>i</i> 1
C2:	[ 3.00      5.00      9.00 ]	*	[ 0.05      0.09      0.15 ]	=	$\frac{m_i}{[ 0.158 \quad 0.429 \quad 1.337 ]}$	2
C3:	[ 2.33      5.00      7.00 ]	*	[ 0.05      0.09      0.15 ]	=	$\frac{u_i}{[ 0.123 \quad 0.429 \quad 1.040 ]}$	3

## 4. Cálculo de Grado de Posibilidad

$$V(S_1 \geq S_2) = \begin{cases} 1, si \ m_1 \geq m_2 \\ 0, si \ l_2 \geq u_1 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, en \ otro \ caso \end{cases} \dots \dots \dots (8)$$

Se calcula para los 4 criterios:

		Val. Min			Normalización
		V(S1≥S2)	=	0.502	
C1:	V(S1≥S3)	=	0.530	0.50	0.201
C2:	V(S2≥S1)	=	1.00	1.00	0.400
	V(S2≥S3)	=	1.00		
C3:	V(S3≥S1)	=	1.00	1.00	0.400
	V(S3≥S2)	=	1.00		
<b>2.50</b>					

## 5. Cálculo de pesos difusos de criterios

Seguridad de Manejo (MTD :	20.05%
Deterioro de Pavimento (PC:	39.97%
Comodidad de Manejo (IRI :	39.97%
100.00%	

## 6. Vector de Pesos normalizados

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \dots \dots \dots (3)$$

W= [ 0.201    0.400    0.400 ]

## 1. Matriz de comparación pareada

COMPARACIÓN DE CRITERIOS GENERALES	Seguridad de Manejo (MTD)			Deterioro de Pavimento (PCI)			Comodidad de Manejo (IRI)		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Seguridad de Manejo (MTD)	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 3 ]	[ 5 ]	[ 1 ]	[ 3 ]	[ 5 ]
Deterioro de Pavimento (PCI)	[ 1/5 ]	[ 1/3 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 3 ]
Comodidad de Manejo (IRI)	[ 1/5 ]	[ 1/3 ]	[ 1 ]	[ 1/3 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]

## 2. Suma de filas

$$\begin{array}{ccc}
 & l & m & u \\
 \text{C1:} & [ 3 ] & 7 & 11 \\
 \text{C2:} & [ 2/1/5 ] & 2 1/3 & 5 \\
 \text{C3:} & [ 1 1/2 ] & 2 1/3 & 3 \\
 \\ 
 \hline
 & \mathbf{6.73} & \mathbf{11.67} & \mathbf{19.00}
 \end{array}$$

3. Cálculo del valor de la Extensión sintética difusa con respecto al objeto *i*

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j * \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \dots \dots \dots (7)$$

C1:	[ 3.00      7.00      11.00 ]	*	[ 0.05      0.09      0.15 ]	=	[ 0.158      0.600      1.634 ]	<i>i</i>
C2:	[ 2.20      2.33      5.00 ]	*	[ 0.05      0.09      0.15 ]	=	[ 0.116      0.200      0.743 ]	2
C3:	[ 1.53      2.33      3.00 ]	*	[ 0.05      0.09      0.15 ]	=	[ 0.081      0.200      0.446 ]	3

## 4. Cálculo de Grado de Posibilidad

$$V(S_1 \geq S_2) = \begin{cases} 1, si \quad m_1 \geq m_2 \\ 0, si \quad l_2 \geq u_1 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, en \quad otro \quad caso \end{cases} \dots \dots \dots (8)$$

Se calcula para los 4 criterios:

		Val. Min			Normalización
		V(S1≥S2)	=	1	
C1:	V(S1≥S3)	=	1	1.00	0.497
C2:	V(S2≥S1)	=	0.59		
	V(S2≥S3)	=	1.00	0.59	0.295
C3:	V(S3≥S1)	=	0.42		
	V(S3≥S2)	=	1.00	0.42	0.208
<b>2.01</b>					

## 5. Cálculo de pesos difusos de criterios

$$\begin{array}{lll}
 \text{Seguridad de Manejo (MTD)} & : & 49.70\% \\
 \text{Deterioro de Pavimento (PCI)} & : & 29.51\% \\
 \text{Comodidad de Manejo (IRI)} & : & 20.79\%
 \end{array}$$

100.00%

## 6. Vector de Pesos normalizados

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \dots \dots \dots (3)$$

$$W = [ 0.497 \quad 0.295 \quad 0.208 ]$$

## 1. Matriz de comparación pareada

COMPARACIÓN DE CRITERIOS GENERALES	Seguridad de Manejo (MTD)			Deterioro de Pavimento (PCI)			Comodidad de Manejo (IRI)		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Seguridad de Manejo (MTD)	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1/5 ]	[ 1/3 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 3 ]
Deterioro de Pavimento (PCI)	[ 1 ]	[ 3 ]	[ 5 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 3 ]	[ 5 ]
Comodidad de Manejo (IRI)	[ 1/3 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1/5 ]	[ 1/3 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]	[ 1 ]

## 2. Suma de filas

$$\begin{array}{ccc}
 & l & m & u \\
 \text{C1:} & [ 2 1/5 ] & [ 2 1/3 ] & [ 5 ] \\
 \text{C2:} & [ 3 ] & [ 7 ] & [ 11 ] \\
 \text{C3:} & [ 1 1/2 ] & [ 2 1/3 ] & [ 3 ] \\
 \\ 
 \hline
 & \mathbf{6.73} & \mathbf{11.67} & \mathbf{19.00}
 \end{array}$$

3. Cálculo del valor de la Extensión sintética difusa con respecto al objeto *i*

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j * \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \dots \dots \dots (7)$$

C1:	[ 2.20      2.33      5.00 ]	[ 0.05      0.09      0.15 ]	[ 0.116      0.200      0.743 ]	i 1
C2:	[ 3.00      7.00      11.00 ]	[ 0.05      0.09      0.15 ]	[ 0.158      0.600      1.634 ]	2
C3:	[ 1.53      2.33      3.00 ]	[ 0.05      0.09      0.15 ]	[ 0.081      0.200      0.446 ]	3

## 4. Cálculo de Grado de Posibilidad

$$V(S_1 \geq S_2) = \begin{cases} 1, si \ m_1 \geq m_2 \\ 0, si \ l_2 \geq u_1 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, en \ otro \ caso \end{cases} \dots \dots \dots (8)$$

Se calcula para los 4 criterios:

		Val. Min			Normalización
		V(S1≥S2)	=	0.635	
C1:	{	V(S1≥S3)	=	1	0.64
					0.309
C2:	{	V(S2≥S1)	=	1.00	
		V(S2≥S3)	=	1.00	1.000
					0.487
C3:	{	V(S3≥S1)	=	1.00	
		V(S3≥S2)	=	0.42	0.418
					0.204
					<hr style="width: 100px; margin-left: 0;"/>
					<b>2.05</b>

## 5. Cálculo de pesos difusos de criterios

$$\begin{array}{lll}
 \text{Seguridad de Manejo (MTD)} & : & 30.94\% \\
 \text{Deterioro de Pavimento (PCI)} & : & 48.69\% \\
 \text{Comodidad de Manejo (IRI)} & : & 20.37\%
 \end{array}$$

---

100.00%

## 6. Vector de Pesos normalizados

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \dots \dots \dots (3)$$

W= 
$$\begin{bmatrix} 0.309 & 0.487 & 0.204 \end{bmatrix}$$

## ANEXO D: INVENTARIO DE FALLAS PCI

**Tabla 52**

*Inventario de Fallas – Tramo 1*

Tramo	Progresiva (km)	UM	Cód.	Tipo de Falla	Severidad	Dimensiones				Total	Unidad
						Cantidad	Longitud (m)	Ancho (m)	Profund idad (cm)		
<b>1</b>	00+050 - 00+100	1	1	Piel de cocodrilo	M		6	2.25		13.5	m <sup>2</sup>
			7	Grieta de borde	M		2			2	m
			7	Grieta de borde	M		5			5	m
			19	Desprendimiento de agregados	B		10.9	5.5		60	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	M	1		0.52	2	1	Und
	00+100 - 00+150	2	19	Desprendimiento de agregados	B		12.4	2		24.8	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	B		3.75	2		7.5	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	A	1		0.6	3	1	Und
	00+150 - 00+200	3	13	Huecos (Baches)	A	1		0.55	2.8	1	Und
			19	Desprendimiento de agregados	B		5	3		15	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	B		4.4	2.5		11	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	B		5.4	2.5		13.5	m <sup>2</sup>
	00+200 - 00+250	4	19	Desprendimiento de agregados	M		2.75	2		5.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		4.27	2.25		9.6	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	M	1		0.37	2.8	1	Und
	00+250 - 00+300	5	19	Desprendimiento de agregados	M		3	2.5		7.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		4	2.5		10	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		2	2.5		5	m <sup>2</sup>
	00+350. - 00+400	6	19	Desprendimiento de agregados	M		2	1		2	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		5	3		15	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		10	5.5		55	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	B		5.2	2.5		13	m <sup>2</sup>

**Tabla 53***Inventario de Fallas – Tramo 2*

Tramo	Progresiva (km)	UM	Cód.	Tipo de Falla	Severidad	Dimensiones				Total	Unidad
						Cantidad	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor/ Profund idad (cm)		
2	00+476 - 00+526	1	4	Abultamientos y hundimientos	M		2.7			2.7	m
			19	Desprendimiento de agregados	M		10	2		20	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		14.2	2.5		35.5	m <sup>2</sup>
	00+526 - 00+576	2	19	Desprendimiento de agregados	M		5	3		15	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		9	2		18	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	A	1		0.75	3	1	Und
	00+576 - 00+626	3	4	Abultamientos y hundimientos	M		2.5			2.5	m
			19	Desprendimiento de agregados	M		2	2		4	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		6	2		12	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		3.8	2.1		8	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		10	2		20	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		20	2.5		50	m <sup>2</sup>
	00+626 - 00+676	4	4	Abultamientos y hundimientos	M		3.6			3.6	m
			4	Abultamientos y hundimientos	M		1.5			1.5	m
			19	Desprendimiento de agregados	M		10	2.5		25	m <sup>2</sup>
	00+676 - 00+726	5	19	Desprendimiento de agregados	A		7.5	2		15	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	A	1		0.85	3.2	1	Und
			13	Huecos (Baches)	A	1		1	3.3	1	Und
	00+726 - 00+776	6	1	Piel de cocodrilo	A		2.2	1		2.2	m <sup>2</sup>
			4	Abultamientos y hundimientos	B		3			3	m
			19	Desprendimiento de agregados	A		2.5	1		2.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		2	2.5		5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		3	2.5		7.5	m <sup>2</sup>

**Tabla 54***Inventario de Fallas – Tramo 3*

Tramo	Progresiva (km)	UM	Cód.	Tipo de Falla	Severidad	Dimensiones				Total	Unidad
						Cantidad	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor/Profundidad (cm)		
3	00+902 - 00+952	1	4	Abultamientos y hundimientos	B		2.5			2.5	m
			4	Abultamientos y hundimientos	B		1			1	m
			6	Depresión	B		10	2.5		25	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		2	2		4	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	A	1		1	3	1	Und
			13	Huecos (Baches)	A	1		0.87	3.5	1	Und
			13	Huecos (Baches)	A	1		0.85	3.5	1	Und
			13	Huecos (Baches)	A	1		1.7	3.5	1	Und
			13	Huecos (Baches)	A	1		1.5	3.5	1	Und
			13	Huecos (Baches)	A	1		1.85	4	1	Und
			13	Huecos (Baches)	A	1		1.2	3.5	1	Und
			13	Huecos (Baches)	A	1		1	3.5	1	Und
	00+952 - 01+002	2	4	Abultamientos y hundimientos	M		5.5			5.5	m
			19	Desprendimiento de agregados	M		10	2.75		27.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		1.8	1		1.8	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		6	2		12	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	A	1		1.15	3	1	Und
	01+002 - 01+052	3	19	Desprendimiento de agregados	A		2	17.9		35.8	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		19.8	5		99	m <sup>2</sup>
	01+052 - 01+102	4	13	Huecos (Baches)	A	1		0.7	2.8	1	Und
			19	Desprendimiento de agregados	A		2	2		4	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		22	2.25		49.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		4	2.5		10	m <sup>2</sup>
	01+102 - 01+152	5	6	Depresión	M		10	2.9		29	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		15	5.5		82.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		10	2.55		25.5	m <sup>2</sup>
	01+152 - 01+202	6	19	Desprendimiento de agregados	A		5	1.7		8.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		6	2		12	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		6	3		18	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		10	2		20	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		3	2.83		8.5	m <sup>2</sup>

**Tabla 55**

*Inventario de Fallas – Tramo 4*

Tramo	Progresiva (km)	UM	Cód.	Tipo de Falla	Severidad	Dimensiones				Total	Unidad
						Cantidad	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor/Profundidad (cm)		
4	01+328 - 01+378	1	7	Grieta de borde	B		4			4	m
			10	Grietas Longit. y Transver.	B		6			6	m
			19	Desprendimiento de agregados	M		20	2.25		45	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		10	4		40	m <sup>2</sup>
	01+378 - 01+428	2	19	Desprendimiento de agregados	M		8.5	2		17	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		11.5	2		23	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		10	2.5		25	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		10	4		40	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	M	1		0.5	2	1	Und
			13	Huecos (Baches)	M	1		0.6	2.5	1	Und
	01+428 - 01+478	3	13	Huecos (Baches)	M	1		0.45	2.5	1	Und
			19	Desprendimiento de agregados	M		19.1	5		95.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		4.55	5.5		25	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		10	3		30	m <sup>2</sup>
			7	Grieta de borde	B		5			5	m
			7	Grieta de borde	B		7			7	m
	01+478 - 01+528	4	19	Desprendimiento de agregados	M		2	0.55		1.1	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		1	1		1	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		1	0.9		0.9	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		1	0.8		0.8	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		1.3	1		1.3	m <sup>2</sup>
			6	Depresión	M		11	4		44	m <sup>2</sup>
	01+528 - 01+578	5	19	Desprendimiento de agregados	M		8.8	2		17.6	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		4.4	2.75		12.1	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		15	5.5		82.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		9	5		45	m <sup>2</sup>
			7	Grieta de borde	M		5.5			5.5	m
			4	Abultamientos y hundimientos	M		3.5			3.5	m
			4	Abultamientos y hundimientos	M		7			7	m
	01+578 - 01+628	6	7	Grieta de borde	M		5.5			5.5	m
			19	Desprendimiento de agregados	M		2	0.55		1.1	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		5	1		5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		8.5	2		17	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		5	3		15	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	M	1		0.55	2	1	Und
			13	Huecos (Baches)	M	1		0.5	2	1	Und

**Tabla 56***Inventario de Fallas – Tramo 5*

Tramo	Progresiva (km)	UM	Cód.	Tipo de Falla	Severidad	Dimensiones				Total	Unidad
						Cantidad	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor/Profundidad (cm)		
5	01+754 - 01+804	1	7	Grieta de borde	M		10			10	m
			7	Grieta de borde	M		5			5	m
			19	Desprendimiento de agregados	A		7.5	2		15	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		10	5		50	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	A	1			0.75	3	1 Und
	01+804 - 01+854	2	1	Piel de cocodrilo	M		2.5	1		2.5	m <sup>2</sup>
			12	Pulimento de agregados	M		2.5	2		5	m <sup>2</sup>
	01+854 - 01+904	3	19	Desprendimiento de agregados	M		6	2.5		15	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	M		5	2.5		12.5	m <sup>2</sup>
			13	Huecos (Baches)	A	1			0.88	3	1 Und
	01+904 - 01+954	4	19	Desprendimiento de agregados	A		2	1		2	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		1	2.5		2.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		2	2		4	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		3	2		6	m <sup>2</sup>
	01+954 - 02+004	5	1	Piel de cocodrilo	A		1	1		1	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		2	1		2	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		4.5	1		4.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		4	1.5		6	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		2.5	1		2.5	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		3.5	2		7	m <sup>2</sup>
	02+004 - 02+054	6	4	Abultamientos y hundimientos	M		2.8			2.8	m
			19	Desprendimiento de agregados	A		6	2.5		15	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		10	2		20	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		11	2		22	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		4	2		8	m <sup>2</sup>
			19	Desprendimiento de agregados	A		2	1		2	m <sup>2</sup>

## ANEXO E: REPORTES DE EVALPAVCAR DE VALORES PCI

**Tabla 57**

*Reporte de EvalPavCar – Tramo 1*

TRAMO	AREA (m <sup>2</sup> )	UNIDAD DE MUESTRA	PROGRESIVA INICIAL	PROGRESIVA FINAL	DAÑO	SEVERIDAD	01	02	03	04	05	TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
Tramo 1	275.0	1	00+050	00+100	1	M	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5	4.9	39
	275.0	1	00+050	00+100	7	M	2.0	5.0	0.0	0.0	0.0	7.0	2.5	7
	275.0	1	00+050	00+100	19	L	60	0.0	0.0	0.0	0.0	60.0	21.8	8
	275.0	1	00+050	00+100	13	M	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	16
	275.0	2	00+100	00+150	19	L	24.8	7.5	0.0	0.0	0.0	32.2	11.7	5
	275.0	2	00+100	00+150	13	H	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	34
	275.0	3	00+150	00+200	13	H	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	34
	275.0	3	00+150	00+200	19	L	15.0	10.0	13.5	0.0	0.0	38.5	14.0	6
	275.0	4	00+200	00+250	19	M	5.5	9.6	0.0	0.0	0.0	15.1	5.5	13
	275.0	4	00+200	00+250	13	M	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	16
	275.0	5	00+250	00+300	19	M	7.5	10.0	0.0	0.0	0.0	17.5	6.4	14
	275.0	5	00+250	00+300	19	L	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3	8
	275.0	6	00+350	00+400	19	M	2.0	15.0	55.0	13.0	0.0	85.0	30.9	29

**Tabla 58**

Reporte de EvalPavCar – Tramo 2

TRAMO	AREA (m <sup>2</sup> )	UNIDAD DE MUESTRA	PROGRESIVA INICIAL	PROGRESIVA FINAL	DAÑO	SEVERIDAD	01	02	03	04	05	TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
	275.0	1	00+476	00+526	4	M	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	1.0	11
	275.0	1	00+476	00+526	19	M	20.0	35.5	0.0	0.0	0.0	55.5	20.2	26
	275.0	2	00+526	00+576	19	M	15.0	18.0	0.0	0.0	0.0	33.0	12.0	20
	275.0	2	00+526	00+576	13	H	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	34
	275.0	3	00+576	00+626	4	M	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.9	11
	275.0	3	00+576	00+626	19	M	4.0	12.0	8.0	20.0	50.0	94.0	34.2	30
Tramo 2	275.0	4	00+626	00+676	4	M	3.6	1.5	0.0	0.0	0.0	5.1	1.9	17
	275.0	4	00+626	00+676	19	M	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	9.1	17
	275.0	5	00+676	00+726	19	H	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.0	5.4	31
	275.0	5	00+676	00+726	13	H	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.7	46
	275.0	6	00+726	00+776	1	H	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.8	27
	275.0	6	00+726	00+776	4	L	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.1	2
	275.0	6	00+726	00+776	19	H	2.5	5.0	7.5	0.0	0.0	15.0	5.4	31

**Tabla 59**

Reporte de EvalPavCar – Tramo 3

TRAMO	AREA (m <sup>2</sup> )	UNIDAD DE MUESTRA	PROGRESIVA INICIAL	PROGRESIVA FINAL	DAÑO	SEVERIDAD	01	02	03	04	05	TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
Tramo 3	275.0	1	00+902	00+952	4	L	2.5	1.0	0.0	0.0	0.0	3.5	1.3	3
	275.0	1	00+902	00+952	6	L	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	9.1	17
	275.0	1	00+902	00+952	19	M	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	1.5	9
	275.0	1	00+902	00+952	13	H	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	2.9	75
	275.0	2	00+952	01+002	4	M	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	2.0	18
	275.0	2	00+952	01+002	19	M	27.5	1.8	12.0	0.0	0.0	41.3	15.0	23
	275.0	2	00+952	01+002	13	H	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	34
	275.0	3	01+002	01+052	19	H	38.5	99.0	0.0	0.0	0.0	137.5	50.0	69
	275.0	4	01+052	01+102	13	H	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	34
	275.0	4	01+052	01+102	19	H	4.0	49.5	10.0	0.0	0.0	63.5	23.1	59
	275.0	5	01+102	01+152	6	M	29.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.0	10.6	31
	275.0	5	01+102	01+152	19	M	82.5	25.5	0.0	0.0	0.0	108.0	39.3	31
	275.0	6	01+152	01+202	19	H	8.5	12.0	18.0	20.0	8.5	67.0	24.4	60

**Tabla 60**

Reporte de EvalPavCar – Tramo 4

TRAMO	AREA (m <sup>2</sup> )	UNIDAD DE MUESTRA	PROGRESIVA INICIAL	PROGRESIVA FINAL	DAÑO	SEVERIDAD	01	02	03	04	05	TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
Tramo 4	275.0	1	01+328	01+378	7	L	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	1.5	3
	275.0	1	01+328	01+378	10	L	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	2.2	0
	275.0	1	01+328	01+378	19	M	45.0	40.0	0.0	0.0	0.0	85.0	30.9	29
	275.0	2	01+378	01+428	19	M	17.0	23.0	25.0	40.0	0.0	105.0	38.2	31
	275.0	2	01+378	01+428	13	M	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0
	275.0	3	01+428	01+478	13	M	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	16
	275.0	3	01+428	01+478	19	M	95.5	25.0	30.0	0.0	0.0	150.5	54.7	35
	275.0	3	01+428	01+478	7	L	5.0	7.0	0.0	0.0	0.0	12.0	4.4	5
	275.0	4	01+478	01+528	19	M	1.1	1.0	0.9	0.8	1.3	5.1	1.8	10
	275.0	4	01+478	01+528	6	M	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.0	16.0	39
	275.0	5	01+528	01+578	19	M	17.6	12.1	82.5	45.0	0.0	157.2	57.2	35
	275.0	5	01+528	01+578	7	M	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	2.0	7
	275.0	5	01+528	01+578	4	M	3.5	7.0	0.0	0.0	0.0	10.5	3.8	25
	275.0	6	01+578	01+628	7	M	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	2.0	7
	275.0	6	01+578	01+628	19	M	1.1	5.0	17.0	15.0	0.0	38.1	13.9	22
	275.0	6	01+578	01+628	13	M	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.7	26

**Tabla 61**

Reporte de EvalPavCar – Tramo 5

TRAMO	AREA (m <sup>2</sup> )	UNIDAD DE MUESTRA	PROGRESIVA INICIAL	PROGRESIVA FINAL	DAÑO	SEVERIDAD	01	02	03	04	05	TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
Tramo 5	275.0	1	01+754	01+804	7	M	10.0	5.0	0.0	0.0	0.0	15.0	5.4	10
	275.0	1	01+754	01+804	19	H	15.0	50.0	0.0	0.0	0.0	65.0	23.6	59
	275.0	1	01+754	01+804	13	H	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	34
	275.0	2	01+804	01+854	1	M	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.9	20
	275.0	2	01+804	01+854	12	M	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.8	0
	275.0	3	01+854	01+904	19	M	15.0	12.5	0.0	0.0	0.0	27.5	10.0	18
	275.0	3	01+854	01+904	13	H	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	34
	275.0	4	01+904	01+954	19	H	2.0	2.5	4.0	6.0	0.0	14.5	5.3	31
	275.0	5	01+954	02+004	1	H	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	19
	275.0	5	01+954	02+004	19	H	2.0	4.5	6.0	2.5	7.0	22.0	8.0	37
	275.0	6	02+004	02+054	4	M	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	1.0	11
	275.0	6	02+004	02+054	19	H	15.0	20.0	22.0	8.0	2.0	67.0	24.4	60

## ANEXO F: REPORTE DE ROADROID DE VALORES *CIRI Y eIRI*

**Tabla 62**

*Valores cIRI y eIRI de Tramo 1, carril Derecho.*

<b>Carril Derecho</b>				
<b>Progresiva</b>	<b>cIRI</b>	<b>eIRI</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
<b>0+000.00</b>	0	0.6	-7.150755	-78.456195
<b>0+020.00</b>	0	2.1	-7.150755	-78.456195
<b>0+040.00</b>	0	1.6	-7.150559	-78.456373
<b>0+050.00</b>	2.2	3.8	-7.150488	-78.45643
<b>0+070.00</b>	4.2	2.1	-7.150402	-78.456498
<b>0+090.00</b>	4.3	2.1	-7.150402	-78.456498
<b>0+110.00</b>	4.6	1.8	-7.150308	-78.456573
<b>0+120.00</b>	2.9	1.5	-7.150107	-78.456734
<b>0+140.00</b>	2.9	1.5	-7.150107	-78.456734
<b>0+160.00</b>	5.8	1.5	-7.150107	-78.456734
<b>0+180.00</b>	5.8	1.5	-7.150107	-78.456734
<b>0+190.00</b>	2.1	1.2	-7.149996	-78.45682
<b>0+210.00</b>	1.4	1.2	-7.149875	-78.456916
<b>0+230.00</b>	1.4	1.2	-7.149875	-78.456916
<b>0+250.00</b>	1.9	1.4	-7.149759	-78.457005
<b>0+260.00</b>	1.9	1.4	-7.149646	-78.457096
<b>0+280.00</b>	3.5	1.7	-7.149539	-78.457187
<b>0+300.00</b>	3.5	1.7	-7.149438	-78.457246
<b>0+320.00</b>	2.5	1.4	-7.149339	-78.457317
<b>0+330.00</b>	2.5	1.4	-7.149235	-78.457378
<b>0+350.00</b>	2.5	1.4	-7.149135	-78.457425
<b>0+370.00</b>	3.2	1.4	-7.149135	-78.457425
<b>0+390.00</b>	3.2	1.5	-7.149011	-78.457465
<b>0+400.00</b>	3.7	2	-7.148889	-78.457493
<b>0+420.00</b>	3.7	2	-7.148889	-78.457493
<b>0+440.00</b>	2.3	1.5	-7.148776	-78.457516
<b>0+460.00</b>	2.7	1.5	-7.148626	-78.457537
<b>0+480.00</b>	2.7	1.2	-7.148626	-78.457537
<b>0+490.00</b>	2.5	1.2	-7.148497	-78.457556
<b>0+510.00</b>	2.5	1.4	-7.148347	-78.457581
<b>0+530.00</b>	2.5	1.4	-7.148347	-78.457581
<b>0+550.00</b>	3.3	12.7	-7.143651	-78.463308
<b>0+560.00</b>	1.6	9.45	-7.143593	-78.463355
<b>0+580.00</b>	1.6	10.85	-7.143541	-78.463374
<b>0+600.00</b>	0.6	13.15	-7.143459	-78.463395
<b>0+620.00</b>	0.6	13.6	-7.143364	-78.463419
<b>0+630.00</b>	0.5	13.3	-7.143289	-78.463423

<b>0+650.00</b>	0.5	11.7	-7.143171	-78.463437
<b>0+670.00</b>	0.5	16.3	-7.143051	-78.463429
<b>0+690.00</b>	0.5	11.3	-7.142958	-78.463428
<b>0+700.00</b>	1.3	11.3	-7.142897	-78.463424
<b>0+720.00</b>	3	11.1	-7.14282	-78.463423
<b>0+740.00</b>	3	9.4	-7.142751	-78.46343
<b>0+760.00</b>	2	16.35	-7.142619	-78.46344
<b>0+770.00</b>	1.1	14.15	-7.142555	-78.463456
<b>0+790.00</b>	1.1	12.95	-7.142429	-78.463468
<b>0+810.00</b>	6	10.15	-7.142356	-78.463503
<b>0+830.00</b>	6.6	9.8	-7.142262	-78.463535
<b>0+840.00</b>	6.6	8.65	-7.142164	-78.463574
<b>0+860.00</b>	3.2	10.4	-7.142066	-78.463615
<b>0+880.00</b>	3.2	8.45	-7.141948	-78.463665
<b>0+900.00</b>	2.7	7	-7.141832	-78.463716
<b>0+920.00</b>	2.7	7.55	-7.141719	-78.463772
<b>0+930.00</b>	4.2	7.55	-7.141586	-78.463845
<b>0+950.00</b>	4.2	8.4	-7.141469	-78.463908
<b>0+970.00</b>	4.2	8.4	-7.141333	-78.463975
<b>0+990.00</b>	4.3	6.95	-7.141204	-78.464026
<b>1+000.00</b>	4.3	9.65	-7.141204	-78.464026
<b>1+020.00</b>	4.3	9.65	-7.141204	-78.464026
<b>1+040.00</b>	3.1	8.5	-7.141082	-78.464068
<b>1+060.00</b>	3.1	8.5	-7.141082	-78.464068
<b>1+070.00</b>	5.4	8.5	-7.141082	-78.464068
<b>1+090.00</b>	5.4	7.6	-7.140945	-78.464111
<b>1+110.00</b>	4.2	7.6	-7.140828	-78.464148
<b>1+130.00</b>	4.2	13.55	-7.140703	-78.464184
<b>1+140.00</b>	12	13.55	-7.140703	-78.464184
<b>1+160.00</b>	12	13.55	-7.140703	-78.464184
<b>1+180.00</b>	2.3	6.95	-7.140551	-78.464225
<b>1+200.00</b>	6.1	20.45	-7.140551	-78.464225
<b>1+210.00</b>	6.1	12.85	-7.140503	-78.464237
<b>1+230.00</b>	2.4	16.35	-7.140369	-78.464271
<b>1+250.00</b>	2.4	10.4	-7.14025	-78.464299
<b>1+270.00</b>	5.4	7.8	-7.140167	-78.464317
<b>1+280.00</b>	5.4	8.95	-7.14009	-78.464338
<b>1+300.00</b>	3.2	9.7	-7.14009	-78.464338
<b>1+320.00</b>	4.3	8.95	-7.13999	-78.464382
<b>1+340.00</b>	7.2	9.25	-7.139805	-78.464411
<b>1+360.00</b>	5.7	7.95	-7.139695	-78.464442
<b>1+370.00</b>	2.9	7.7	-7.139596	-78.464468
<b>1+390.00</b>	2.2	7.7	-7.139492	-78.464495
<b>1+410.00</b>	2.2	7.7	-7.139492	-78.464495
<b>1+430.00</b>	3.8	9.5	-7.139381	-78.464521

<b>1+440.00</b>	5.5	9.5	-7.139279	-78.464544
<b>1+460.00</b>	4.3	9.4	-7.139155	-78.464573
<b>1+480.00</b>	4.1	8.45	-7.139034	-78.464603
<b>1+500.00</b>	4.1	8.45	-7.139034	-78.464603
<b>1+510.00</b>	2.8	6.8	-7.138919	-78.464629
<b>1+530.00</b>	6.8	11.95	-7.138783	-78.46466
<b>1+550.00</b>	6.5	9.4	-7.138653	-78.46469
<b>1+570.00</b>	6.5	9.4	-7.138653	-78.46469
<b>1+580.00</b>	6.5	9.4	-7.138653	-78.46469
<b>1+600.00</b>	3.1	7.1	-7.138531	-78.464717
<b>1+620.00</b>	4.1	6.6	-7.138396	-78.464744
<b>1+640.00</b>	3	6.95	-7.138284	-78.464769
<b>1+650.00</b>	2.4	7	-7.138172	-78.464801
<b>1+670.00</b>	3.4	13.1	-7.138059	-78.464841
<b>1+690.00</b>	3.4	13.1	-7.138059	-78.464841
<b>1+710.00</b>	9.8	11.4	-7.137961	-78.464881
<b>1+720.00</b>	9.8	11.4	-7.137852	-78.464927
<b>1+740.00</b>	2.8	7.25	-7.137755	-78.464967
<b>1+760.00</b>	3	7.3	-7.137652	-78.465002
<b>1+780.00</b>	3	7.3	-7.137652	-78.465002
<b>1+800.00</b>	2	8.05	-7.137541	-78.465026
<b>1+810.00</b>	2.9	8.05	-7.137437	-78.465035
<b>1+830.00</b>	2.9	7.7	-7.137437	-78.465035
<b>1+850.00</b>	4.1	7.15	-7.137198	-78.465028
<b>1+870.00</b>	4.1	7.15	-7.137198	-78.465028
<b>1+880.00</b>	4.1	7.15	-7.137198	-78.465028
<b>1+900.00</b>	3.4	8.3	-7.137001	-78.465005
<b>1+920.00</b>	2.7	11.1	-7.136902	-78.464983
<b>1+940.00</b>	2.7	11.1	-7.136902	-78.464983
<b>1+950.00</b>	0.7	13.55	-7.136798	-78.464946
<b>1+970.00</b>	1.3	13	-7.136694	-78.464897
<b>1+990.00</b>	1.3	15.95	-7.136599	-78.464821
<b>2+010.00</b>	4	12.8	-7.136531	-78.464758
<b>2+020.00</b>	4	11.2	-7.136492	-78.464719
<b>2+040.00</b>	2.1	11.65	-7.136454	-78.464681
<b>2+060.00</b>	4.2	10.65	-7.13641	-78.464582
<b>2+080.00</b>	3.7	14.4	-7.136333	-78.464461
<b>2+090.00</b>	3.7	9.25	-7.136278	-78.464392
<b>2+110.00</b>	4	8.6	-7.136271	-78.464317
<b>2+130.00</b>	1.4	9.3	-7.136274	-78.464243

**Tabla 63**

*Valores cIRI y eIRI de Tramo 1, carril Izquierdo.*

Carril Izquierdo				
Progresiva	cIRI	eIRI	Latitud	Longitud
<b>2+130.00</b>	0	1.5	-7.13627	-78.464066
<b>2+120.00</b>	0	1.8	-7.136266	-78.464122
<b>2+110.00</b>	0	2.5	-7.136258	-78.464174
<b>2+100.00</b>	2.2	1.7	-7.136242	-78.464315
<b>2+090.00</b>	2.2	3.1	-7.136249	-78.464395
<b>2+080.00</b>	2.4	3.9	-7.136279	-78.464495
<b>2+070.00</b>	3.7	3	-7.136327	-78.464586
<b>2+060.00</b>	6	11.9	-7.136392	-78.46467
<b>2+040.00</b>	4.3	17.1	-7.13653	-78.464797
<b>2+030.00</b>	5.2	17.1	-7.136582	-78.464844
<b>2+020.00</b>	5.2	2.1	-7.136619	-78.464878
<b>2+010.00</b>	0.2	9.9	-7.136702	-78.464931
<b>2+000.00</b>	1.1	9.4	-7.136734	-78.464952
<b>1+990.00</b>	1.1	1.8	-7.136859	-78.46501
<b>1+970.00</b>	3.2	1.7	-7.137048	-78.465046
<b>1+960.00</b>	3	1.7	-7.13716	-78.465053
<b>1+950.00</b>	2.2	1.7	-7.137271	-78.465057
<b>1+940.00</b>	3.1	1.8	-7.137385	-78.465065
<b>1+920.00</b>	2.8	3.3	-7.137501	-78.465064
<b>1+910.00</b>	3.1	1.9	-7.137617	-78.465064
<b>1+880.00</b>	2.8	2.1	-7.137835	-78.464967
<b>1+870.00</b>	2.1	3.1	-7.137954	-78.464916
<b>1+860.00</b>	2.8	2.3	-7.138061	-78.464869
<b>1+850.00</b>	3.8	2.2	-7.138167	-78.464833
<b>1+830.00</b>	3.5	7.5	-7.138275	-78.464807
<b>1+820.00</b>	6.3	7.5	-7.138383	-78.464783
<b>1+810.00</b>	4.4	3.1	-7.138512	-78.464754
<b>1+790.00</b>	3.8	3.2	-7.138639	-78.464727
<b>1+780.00</b>	3.8	1.9	-7.138767	-78.4647
<b>1+760.00</b>	6.9	14.9	-7.138899	-78.464669
<b>1+750.00</b>	3.1	1.8	-7.139029	-78.464636
<b>1+730.00</b>	3	3.4	-7.139159	-78.464603
<b>1+720.00</b>	1.8	2.6	-7.139283	-78.464573
<b>1+710.00</b>	9.3	13.6	-7.139399	-78.464547
<b>1+690.00</b>	0.6	4.3	-7.139514	-78.464518
<b>1+680.00</b>	1.7	6.8	-7.139627	-78.464488
<b>1+670.00</b>	1.7	2.2	-7.139736	-78.464459
<b>1+650.00</b>	2.1	2.2	-7.139864	-78.464426
<b>1+640.00</b>	2.1	1.7	-7.139987	-78.464395
<b>1+620.00</b>	1.9	2.1	-7.140106	-78.464366

<b>1+610.00</b>	1.9	6.2	-7.140225	-78.464336
<b>1+600.00</b>	0.5	6.3	-7.140329	-78.46431
<b>1+590.00</b>	0.5	3	-7.140434	-78.464286
<b>1+580.00</b>	1.7	6.1	-7.140507	-78.464268
<b>1+570.00</b>	1.7	2.5	-7.140578	-78.464246
<b>1+560.00</b>	2.2	4.2	-7.140699	-78.464211
<b>1+550.00</b>	2.6	2.5	-7.140765	-78.464194
<b>1+540.00</b>	2.6	3.3	-7.140846	-78.464175
<b>1+530.00</b>	0.4	9.2	-7.140939	-78.464147
<b>1+520.00</b>	2	2.4	-7.141037	-78.464116
<b>1+500.00</b>	4.3	8.1	-7.141152	-78.464078
<b>1+490.00</b>	1.8	2	-7.141262	-78.464037
<b>1+480.00</b>	1.8	1.8	-7.141374	-78.463986
<b>1+460.00</b>	3.1	2.3	-7.141485	-78.46393
<b>1+450.00</b>	3.1	1.9	-7.141584	-78.463875
<b>1+440.00</b>	3.4	3.7	-7.141696	-78.463813
<b>1+420.00</b>	3.6	2.1	-7.141798	-78.463762
<b>1+410.00</b>	2.7	2.1	-7.141895	-78.463717
<b>1+400.00</b>	1.7	2.8	-7.142003	-78.463668
<b>1+390.00</b>	3.2	1.9	-7.142109	-78.463622
<b>1+370.00</b>	3.6	3.2	-7.142214	-78.463578
<b>1+360.00</b>	3.2	4.7	-7.14232	-78.46354
<b>1+350.00</b>	2.2	2.3	-7.14242	-78.463511
<b>1+340.00</b>	2.2	2.3	-7.14251	-78.463491
<b>1+330.00</b>	2.1	4.6	-7.142611	-78.463473
<b>1+320.00</b>	0.3	3.5	-7.142695	-78.463465
<b>1+310.00</b>	0.4	6.6	-7.142722	-78.46346
<b>1+300.00</b>	1.6	4.2	-7.142857	-78.46435
<b>1+290.00</b>	1.7	5.4	-7.142999	-78.464345
<b>1+280.00</b>	1.7	7.9	-7.143067	-78.463464
<b>1+270.00</b>	0.7	3.7	-7.143135	-78.463469
<b>1+260.00</b>	13.8	17.5	-7.143176	-78.463471
<b>1+250.00</b>	2.3	1.9	-7.143347	-78.463457
<b>1+240.00</b>	5.9	3.1	-7.143414	-78.463444
<b>1+230.00</b>	3	2.6	-7.143483	-78.463426
<b>1+220.00</b>	4.4	5.3	-7.143566	-78.463398
<b>1+210.00</b>	4.2	4.7	-7.143713	-78.463351
<b>1+200.00</b>	3.3	2.3	-7.143774	-78.463323
<b>1+190.00</b>	3.3	2.6	-7.143848	-78.46327
<b>1+180.00</b>	2.6	2.6	-7.143916	-78.463247
<b>1+170.00</b>	2.6	2.1	-7.143971	-78.463179
<b>1+160.00</b>	0.7	7.4	-7.144031	-78.463143
<b>1+150.00</b>	0.6	6.7	-7.144102	-78.463096
<b>1+140.00</b>	3.1	8.4	-7.144225	-78.463004
<b>1+130.00</b>	3.1	7.1	-7.144272	-78.462978

<b>1+120.00</b>	4.5	4.3	-7.144325	-78.462948
<b>1+100.00</b>	4.5	4.3	-7.144509	-78.462817
<b>1+090.00</b>	1.9	3.7	-7.144574	-78.462776
<b>1+080.00</b>	3.6	3.6	-7.144647	-78.462725
<b>1+070.00</b>	3.4	1.7	-7.144731	-78.462668
<b>1+060.00</b>	2.5	5.8	-7.144819	-78.462612
<b>1+040.00</b>	6.1	9.9	-7.144922	-78.46255
<b>1+030.00</b>	2.4	2.3	-7.145012	-78.462496
<b>1+020.00</b>	2.4	5.6	-7.145084	-78.462447
<b>1+010.00</b>	2.2	7.4	-7.145214	-78.462365
<b>1+000.00</b>	2.8	4.9	-7.145325	-78.462279
<b>0+990.00</b>	2.8	17.6	-7.145384	-78.462233
<b>0+980.00</b>	4.8	2	-7.145461	-78.462179
<b>0+960.00</b>	2.6	1.6	-7.145633	-78.46212
<b>0+950.00</b>	2.9	1.9	-7.145725	-78.461988
<b>0+940.00</b>	6.6	6.7	-7.145811	-78.46192
<b>0+920.00</b>	1.5	6.7	-7.145889	-78.461858
<b>0+900.00</b>	2.3	2	-7.146013	-78.461801
<b>0+890.00</b>	2.3	2.5	-7.146063	-78.46171
<b>0+880.00</b>	0.4	7	-7.146127	-78.46163
<b>0+870.00</b>	0.4	11.5	-7.146149	-78.461568
<b>0+860.00</b>	1.6	7.1	-7.146189	-78.461537
<b>0+850.00</b>	1.6	8.4	-7.146267	-78.461425
<b>0+840.00</b>	2.4	1.9	-7.146299	-78.461375
<b>0+830.00</b>	2.7	1.8	-7.146325	-78.461329
<b>0+820.00</b>	3.6	2.7	-7.146361	-78.461259
<b>0+810.00</b>	3.5	2.8	-7.146396	-78.46112
<b>0+800.00</b>	6.9	5.3	-7.146417	-78.461057
<b>0+780.00</b>	5.1	2.2	-7.146466	-78.460823
<b>0+770.00</b>	4.8	2.3	-7.146481	-78.460734
<b>0+760.00</b>	3.1	2.2	-7.146495	-78.460631
<b>0+750.00</b>	5.5	4	-7.146505	-78.460536
<b>0+740.00</b>	5.2	2.2	-7.146511	-78.460439
<b>0+710.00</b>	5.2	4.2	-7.146515	-78.460241
<b>0+700.00</b>	6.4	11.8	-7.146514	-78.46014
<b>0+690.00</b>	6.1	4.2	-7.146513	-78.460039
<b>0+680.00</b>	7.1	4.3	-7.14651	-78.459945
<b>0+670.00</b>	4.8	2.2	-7.14651	-78.459849
<b>0+660.00</b>	2.7	2.2	-7.14651	-78.459775
<b>0+650.00</b>	1.4	1.7	-7.146509	-78.459668
<b>0+640.00</b>	0.5	1.8	-7.146506	-78.459561
<b>0+620.00</b>	1.5	2.7	-7.1465	-78.459475
<b>0+610.00</b>	1.5	3.1	-7.146492	-78.459337
<b>0+600.00</b>	1.9	2.1	-7.146489	-78.459246
<b>0+590.00</b>	1.9	5.7	-7.146488	-78.459147

<b>0+580.00</b>	2.7	3.8	-7.146484	-78.459039
<b>0+570.00</b>	3.3	1.7	-7.146478	-78.458928
<b>0+560.00</b>	3.3	2.1	-7.146475	-78.458824
<b>0+540.00</b>	3.1	4.4	-7.146469	-78.458706
<b>0+530.00</b>	3.1	1.8	-7.146474	-78.458496
<b>0+520.00</b>	1.3	1.8	-7.14648	-78.458496
<b>0+510.00</b>	1.8	2.5	-7.146493	-78.458401
<b>0+500.00</b>	1.8	11.2	-7.146518	-78.458328
<b>0+490.00</b>	5.9	17.4	-7.146556	-78.458257
<b>0+480.00</b>	5.9	4.1	-7.146597	-78.458203
<b>0+470.00</b>	2.3	13.3	-7.146647	-78.458158
<b>0+460.00</b>	15.6	23	-7.146712	-78.458113
<b>0+450.00</b>	3.2	2.6	-7.146787	-78.458072
<b>0+440.00</b>	2.5	1.9	-7.146867	-78.458034
<b>0+430.00</b>	2.5	1.5	-7.146957	-78.457996
<b>0+410.00</b>	2.5	3.8	-7.147056	-78.457956
<b>0+400.00</b>	2.5	10.6	-7.147161	-78.457913
<b>0+390.00</b>	0.4	2.9	-7.147275	-78.457865
<b>0+370.00</b>	0.4	2.8	-7.147387	-78.457821
<b>0+360.00</b>	2	7.6	-7.147518	-78.457778
<b>0+350.00</b>	2.1	1.6	-7.147645	-78.457745
<b>0+330.00</b>	1.7	2.3	-7.147773	-78.457719
<b>0+310.00</b>	2.4	2.8	-7.147918	-78.457695
<b>0+290.00</b>	2.9	2.8	-7.148049	-78.457676
<b>0+280.00</b>	2.9	1.9	-7.148196	-78.457654
<b>0+260.00</b>	3.9	7.6	-7.148335	-78.457632
<b>0+250.00</b>	2.4	4.2	-7.148461	-78.457611
<b>0+240.00</b>	3.4	2.6	-7.148605	-78.457586
<b>0+220.00</b>	3.4	1.9	-7.148736	-78.457566
<b>0+210.00</b>	2.7	5	-7.148865	-78.457544
<b>0+190.00</b>	3	1.9	-7.148994	-78.457518
<b>0+180.00</b>	5.1	4.7	-7.149119	-78.457486
<b>0+160.00</b>	3.9	2.6	-7.149241	-78.457443
<b>0+150.00</b>	2.6	1.7	-7.149353	-78.457384
<b>0+140.00</b>	2.6	2.2	-7.149452	-78.457323
<b>0+120.00</b>	6.2	2.2	-7.149562	-78.457248
<b>0+110.00</b>	6.2	2.2	-7.149664	-78.457171
<b>0+090.00</b>	3.4	1.7	-7.149764	-78.457091
<b>0+080.00</b>	3.2	1.7	-7.149868	-78.457008
<b>0+060.00</b>	4.6	2.1	-7.149965	-78.456929
<b>0+050.00</b>	5.8	10	-7.150077	-78.456839
<b>0+030.00</b>	5	15.5	-7.150181	-78.456755
<b>0+020.00</b>	7.2	19.2	-7.150277	-78.456676
<b>0+010.00</b>	4.3	14.4	-7.150379	-78.456589
<b>0+000.00</b>	7.7	9.8	-7.150467	-78.456517

## **ANEXO G: PANEL FOTOGRÁFICO**

### **FOTOGRAFÍA N° 1**

Inicio de Carretera CA-1071



### **FOTOGRAFÍA N° 2**

Identificación de fallas



### **FOTOGRAFÍA N° 3**

Identificación de fallas



## FOTOGRAFÍA N° 4

Identificación de fallas



## FOTOGRAFÍA N° 5

Identificación de fallas



## FOTOGRAFÍA N° 6

Identificación de fallas



## FOTOGRAFÍA N° 7

Medición de fallas



## FOTOGRAFÍA N° 8

Medición de fallas



## FOTOGRAFÍA N° 9

Medición de fallas



## FOTOGRAFÍA N° 10

Identificación de fallas



## FOTOGRAFÍA N° 11

Identificación de fallas



## FOTOGRAFÍA N° 12

Fin de Carretera en estudio



## FOTOGRAFÍA N° 13

Inicio de Levantamiento Topográfico



## FOTOGRAFÍA N° 14

Toma de puntos



## FOTOGRAFÍA N° 15

Fin de Levantamiento topográfico



## **FOTOGRAFÍA N° 16**

Fotografías aéreas de la carretera en estudio



## **FOTOGRAFÍA N° 17**

Fotografías aéreas de la carretera en estudio



## **FOTOGRAFÍA N° 18**

Fotografías aéreas de la carretera en estudio



## **FOTOGRAFÍA N° 19**

Fotografías aéreas de la carretera en estudio



## **FOTOGRAFÍA N° 20**

Fotografías aéreas de la carretera en estudio



## **FOTOGRAFÍA N° 21**

Fotografías aéreas de la carretera en estudio



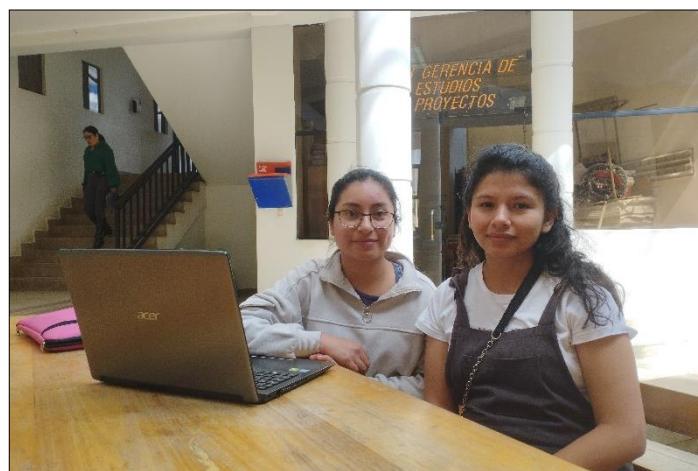
## FOTOGRAFÍA N° 22

Entrevista con expertos



## FOTOGRAFÍA N° 23

Entrevista con expertos



## ANEXO H: PLANOS