

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

“EVALUACIÓN SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE  
UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DEL PCI Y EL  
PROCESAMIENTO DE IMÁGENES BINARIOS  
EN LA RED VIAL NACIONAL PE-40,  
TRAMO: KM 14+145 – KM 20+629,  
TACNA - 2022”

**TESIS**

Presentada por:

**Bach. ROLANDO BELTRAN CHIPANA OREJA**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

TACNA – PERÚ  
2022

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

“EVALUACIÓN SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE  
UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DEL PCI Y EL  
PROCESAMIENTO DE IMÁGENES BINARIOS  
EN LA RED VIAL NACIONAL PE-40,  
TRAMO: KM 14+145 – KM 20+629,  
TACNA - 2022”

Tesis sustentada y aprobada el día 26 de setiembre de 2022  
estando integrado el Jurado Calificador por:

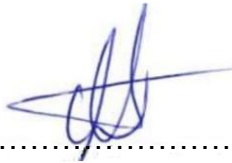
**PRESIDENTE**

  
: .....  
Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas


**SECRETARIO**

  
: .....  
Mtro. Ing. César José Avendaño Jihuallanga

**VOCAL**

  
: .....  
Dr. Ing. Victor Yapuchura Platero

**ASESOR DE TESIS**

  
: .....  
Mtro. Ing. Martin Paucara Rojas

## **DEDICATORIA**

*A Dios, quien me fortalece para dar lo mejor de mí y me provee de salud, sabiduría, paciencia y esperanza para seguir adelante.*

*A mis padres, mis hermanos y a todos quienes han hecho posible ser una persona que va por sus sueños.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A mis padres, por ser mi mayor inspiración, por darme vida y permitirme alcanzar mis sueños.*

*A todos los docentes que han permitido mi formación profesional, por sus enseñanzas y sus conocimientos compartidos y que al igual yo pueda compartir con las personas que más quiero en este mundo.*

*A todos mis compañeros y amistades, quienes siempre han estado a mi lado para ayudarme y me han motivado a superarme día a día.*

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xiii

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>3</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	7
1.3.1 Interrogante general.....	7
1.3.2 Interrogantes específicas.....	7
1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS .....	7
1.4.1 Hipótesis general .....	7
1.4.2 Hipótesis específicas.....	8
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	8
1.6 DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS .....	9

1.6.1	Objetivo general .....	9
1.6.2	Objetivos específicos .....	9
1.7	DEFINICIÓN DE VARIABLES.....	10
1.7.1	Identificación de variables.....	10
1.7.2	Caracterización de las variables .....	10
1.8	ALCANCES Y LIMITACIONES .....	10
1.8.1	Alcances.....	10
1.8.2	Limitaciones .....	11
	<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
2.1	PAVIMENTO.....	12
2.1.1	Tipos de Pavimento .....	12
2.1.2	Evaluación de pavimentos flexibles .....	12
2.1.3	Tipos de Fallas en el Pavimento .....	13
2.2	MÉTODO DEL PCI (Índice de Condición del Pavimento).....	15
2.2.1	Método PCI.....	15
2.2.2	Procedimiento para la evaluación del PCI.....	17
2.2.3	Cálculo del PCI de una sección de pavimento .....	22
2.2.4	Evaluación de la Condición.....	23
2.2.5	Tipos de fallas en un pavimento flexible considerados por el método del PCI. 24	
2.3	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES BINARIOS PARA LA EVALUACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES .....	41
2.3.1	Herramienta de desarrollo .....	41
2.3.2	Procedimiento de captación de imágenes.....	42
2.3.3	Mejora de Imágenes Digitales (Preprocesamiento).....	43
2.3.4	Segmentación de Imágenes Digitales .....	44
	<b>CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>49</b>
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	49

3.2	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	50
3.3	POBLACIÓN Y MUESTRA DE INVESTIGACIÓN .....	50
3.4	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	52
	<b>CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
4.1	DETERMINACION DE RESULTADOS DEL METODO PCI .....	55
4.2	RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES BINARIAS .....	59
4.2.1	Datos resumen obtenidas al ejecutar el código fuente de procesamiento de imágenes en el software Matlab. ....	59
4.2.2	Análisis grafico de fisuras en el pavimento mediante el procesamiento de imágenes binarias en el software Matlab. ....	60
4.2.3	Código Fuente utilizado en el software Maltab, donde se invoca a las funciones que se trata las imágenes binarias. ....	61
4.3	DISCUSION DE RESULTADOS DEL METODO DEL PCI.....	61
4.4	DISCUSION DEL USO DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES BINARIAS .....	62
	<b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>64</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	64
5.2	RECOMENDACIONES .....	64
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>69</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Escala de Clasificación del PCI. ....	16
Tabla 2 Longitudes de Muestreo Asfálticos.....	17
Tabla 3 Longitudes de Asfálticos.....	35
Tabla 4 Cantidad de daños según tipo y severidad .....	56
Tabla 5 Número Admisible Máximo de Deducidos .....	57
Tabla 6 Índice de Condición del Pavimento .....	57
Tabla 7 Porcentaje por Rango de la Condición del Pavimento Flexible de la vía en estudio .....	58
Tabla 8: Resultados de áreas y longitudes obtenidas mediante el procesamiento de imágenes binarias .....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escala de Clasificación del PCI.....	16
Figura 2. Piel de cocodrilo con distintos niveles de severidad. ....	25
Figura 3. Exudación con distintos niveles de severidad. ....	26
Figura 4. Agrietamiento en Bloque con distintos niveles de severidad. ....	27
Figura 5. Abultamientos y hundimientos con distintos niveles de severidad. ....	28
Figura 6. Corrugación con distintos niveles de severidad.....	29
Figura 7. Depresión con distintos niveles de severidad. ....	29
Figura 8. Grieta de Borde con distintos niveles de severidad.....	30
Figura 9. Grieta de Reflexión de Junta con distintos niveles de severidad.....	31
Figura 10. Desnivel de carril/berma con distintos niveles de severidad. ....	32
Figura 11. Parches con distintos niveles de severidad. ....	33
Figura 12. Pulimiento de agregados sin clasificación de severidad definido. ....	34
Figura 13. Huecos con distintos niveles de severidad.....	35
Figura 14. Cruce de vía férrea con distintos niveles de severidad. ....	36
Figura 15. Ahuellamiento con distintos niveles de severidad.....	37
Figura 16. Desplazamiento con distintos niveles de severidad.....	38
Figura 17. Grieta parabólica con distintos niveles de severidad.....	39
Figura 18. Hinchamiento severidad alta.....	40
Figura 19. Peladura con los distintos niveles de severidad.....	41
Figura 20. Etapas del procesamiento digital de imágenes .....	42
Figura 21. Mejora de imagen digital a partir de filtro de mediana .....	44
Figura 22. Grieta procesada a partir de un filtro de mediana y posteriormente a partir de un algoritmo de borde.....	45
Figura 23. Ejemplo de segmentación mediante umbralización .....	46
Figura 24. Detección de huecos a partir de algoritmos de detección de borde y ..	47
Figura 25. Tramo de red vial nacional PE-40 Km14+145 - Km20+629.....	51
Figura 26. Hoja de registro del Método PCI ( ASTM D6433-03,2013).....	53

Figura 27. Gráfico Circular de Porcentajes por Rango de PCI de la vía en estudio .....	58
Figura 28: detección de fisuras mediante el uso de software Matlab .....	60
Figura 29: Imagen que muestra el suavizado de objetos de no son de análisis en el pavimento flexible.....	60
Figura 30. Código fuente de utilización de funciones de procesamientos de imágenes en el Software Matlab .....	61

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como fin determinar el estado actual de condición de la vía con el uso de la metodología Índice de Condición del Pavimento (PCI) y el procesamiento de imágenes binarios en la red vial nacional PE-40, vía ubicada entre los distritos de Calana y Pachía en la región de Tacna.

Se trata de proponer la mejor alternativa de intervención del pavimento para su tratamiento, así como también ser una base de investigación confiable a otros estudiantes, profesionales dedicados a la rama de transportes y a innovar la recolección de datos de manera automatizada. Esta parte de la vía nacional PE-40 cuenta con un total de 6484m de longitud de pavimento, en los que se trata de determinar los parámetros de evaluación, las fallas existentes, su nivel de severidad, así como también su extensión, de modo que se obtenga el valor del PCI.

Como primer paso, se realiza una inspección del lugar de estudio mediante fotografías que son tomadas a lo largo de la vía por ambos carriles con una cámara digital acondicionada en un vehículo siguiendo la posición ideal para conseguir una fotografía ortogonal y se registra en diagramas PCI las diversas fallas presentes en el pavimento obtenidas mediante el procesamiento de las imágenes binarizadas, utilizando el software Matlab. Luego se calcula los diagramas siguiendo estrictamente el procedimiento del PCI según el ASTM D6433 utilizando hojas de cálculo del software Microsoft Excel, el cual nos arrojará el valor de PCI.

Para un resultado de las 15 unidades de muestra, se determina un índice de condición de pavimento de 63.07 y se encuentra un estado de conservación del pavimento BUENO. Finalmente, se incluyen datos procesados que han sido posible determinar el estado de conservación del pavimento.

Palabras Claves: evaluación superficial del pavimento, índice de condición del pavimento, procesamiento de imágenes binarios, estado de conservación del pavimento.

## ABSTRACT

The purpose of this work is to determine the current condition of the road with the use of the Pavement Condition Index (PCI) methodology and the processing of binary images in the national road network PE-40, a road located between the districts of Calana and Pachía in the Tacna region.

It is about proposing the best pavement intervention alternative for its treatment, as well as being a reliable research base for other students, professionals dedicated to the transportation branch and innovating automated data collection. This part of the PE-40 national road has a total of 6484m of pavement length, in which it is a matter of determining the evaluation parameters, the existing faults, their level of severity, as well as their extension, so that the PCI value is obtained.

As a first step, an inspection of the study site is carried out through photographs that are taken along the road in both lanes with a digital camera installed in a vehicle following the ideal position to obtain an orthogonal photograph and the PCI diagrams are recorded. various faults present in the pavement obtained by processing the binarized images, using the Matlab software. Then the diagrams are calculated strictly following the PCI procedure according to ASTM D6433 using Microsoft Excel software spreadsheets, which will give us the PCI value.

For a result of the 15 sample units, a pavement condition index of 63.07 is determined and a GOOD pavement conservation status is found. Finally, processed

data that has been possible to determine the state of conservation of the pavement is included.

Keywords: pavement surface evaluation, pavement condition index, binary image processing, pavement conservation status.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación comprende evaluar superficialmente el pavimento flexible y determinar la condición actual del pavimento en la red vial nacional PE-40, tramo: Km14+145 – km20+629, Tacna. Para poder obtener dicho resultado se deberá inspeccionar las fallas existentes en las muestras de estudio. Con esto nos corresponde investigar en el área de transportes de la ingeniería civil, cuyos conocimientos nos indica el análisis, diseño, ejecución, el mantenimiento y la rehabilitación de todas las vías vecinales, locales y nacionales, que proporcionan una interconexión vial en toda la nación.

Como primer capítulo se menciona los aspectos generales de la investigación; como es; la descripción del problema que da inicio al tema de investigación. Consíguese a esto se plantean, el objetivo general y los específicos de la investigación; Las cuales nos permitirán dar un horizonte de presente trabajo de investigación y además deben ser justificados y priorizados en los ítem de la justificación o importancia de la investigación, también se detallan las limitaciones y los alcances.

Luego en el segundo capítulo se describe el marco teórico, considerándose las investigaciones realizadas a nivel local, nacional e internacional con bases teóricas realizadas por investigadores que son especialistas en el tema que se trata en el presente trabajo y que permite dar rumbo del desarrollo de la investigación. Los antecedentes mencionados describen una revisión bibliográfica exhaustiva de las

investigaciones que se han realizado a nivel nacional e internacional. Estos permiten establecer la importancia de la investigación.

Para el tercer capítulo se menciona los datos sobre la metodología a utilizarse para la realización este trabajo de investigación. En este punto se detalla el método a utilizarse, las actividades que lo involucraran y las herramientas necesarias que se usaran. Además, se detalla un enfoque, un tipo, el nivel de alcance y el diseño utilizado en la investigación. También se menciona las técnicas y los procesos empleados en el trabajo de investigación, para encontrar una respuesta a las interrogantes que ha sido formulados.

En el cuarto capítulo se muestran los resultados importantes obtenidos, así como la discusión de cada resultado concluido de la investigación realizada. Esta sección representa de gran importancia, ya que aquí se interpretan los resultados obtenidos con relación a los antecedentes y a las hipótesis de la investigación formulados.

Como parte final se mencionan las conclusiones y las recomendaciones que se se debe tener en cuenta luego de realizar y analizar las limitaciones y problemáticas durante la ejecución de la investigación.

# **CAPÍTULO I**

## **ASPECTOS GENERALES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

En China Hu et al (2010), plantea un nuevo método para la detección automática de defectos en el pavimento basado en el análisis de texturas y descripción de formas. En comparación con los detectores de bordes convencionales, los resultados experimentales muestran que este método puede detectar correctamente todas las grietas incluso en fondos con texturas complejas o superficies con iluminación desigual.

El sistema de clasificación etiqueta la imagen de acuerdo a lo encontrado: Grietas horizontales, verticales, varias o ninguna (Oliveira & Correia, 2009), define un nuevo marco para la detección de fisuras y clasificación automática de acuerdo con las imágenes adquiridas a gran velocidad, las imágenes resultantes son pre-procesadas utilizando filtros morfológicos para reducir la variación de intensidad de pixeles además, un umbral dinámico se aplica para identificar los pixeles oscuros en las imágenes, ya que estos corresponden a los pixeles de grietas potenciales.

Los métodos de procesamiento digital de imágenes son técnicas, (Alvarado, 2012) y considera el componente numérico de una fotografía, y mediante la aplicación de algoritmos de segmentación, permiten convertir una imagen digital en otra, donde se resalte cierta información de interés, atenuando o eliminando aspectos irrelevantes de la imagen según el tipo de aplicación que se esté llevando a cabo.

(Berrio & Ussa, 2012) describe el diseño e implementación de un sistema para realizar la auscultación de pavimentos rígidos por medio de tratamiento de imágenes, para lo cual se diseñó y desarrolló un MATLAB R2010a, el cual contiene una interfaz gráfica que permite al usuario cargar las imágenes, analizarlas, mostrar los resultados y almacenarlos. El método fue evaluado en una muestra de 17 imágenes de pavimentos rígidos y los resultados obtenidos mostraron que el método de alta precisión brinda una efectividad en la detección de fallas del 87% respecto al 80% que brinda el método de baja precisión, sin embargo, el primer método requiere 13 veces más tiempo de cómputo para el análisis (Berrio & Ussa, 2012).

Muchos investigadores han comenzado a desarrollar métodos de inspección automática con el objetivo de aumentar la eficiencia y la precisión de las inspecciones. Después de la evaluación de deterioros en pavimentos utilizando un robot autónomo (Tseng et al., 2010).

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La evaluación del estado de conservación de una infraestructura vial es importante para evitar sobrecostos de mantenimiento y operación vehicular en un rango que se puede ubicar entre 1 y 3% de su producto interno bruto nacional (Bull, 2003). Las vías con buena condición mejoran el intercambio en lo económico, social, cultural, promueve la integración de personas mediante la interconexión con sus alrededores (Wright & Dixon, 2004).

El método convencional de la detección de fallas de pavimentos es realizado mediante inspecciones visuales, lo que implica que la evaluación sea subjetiva, ocasionando falta de confiabilidad en los resultados (Berrio & Ussa, 2012; Porras et al., 2014; Cafiso et al., 2006). La mejora que se propone es ser útil para aumentar seguridad en la recolección de datos y reducir errores en la interpretación de los mismos, reflejándose así en el resultado final del Pavement Condition Index (PCI). (Battiato et al., 2007).

La red vial nacional PE-40 no está libre al deterioro que se manifiestan en los pavimentos flexibles, lo que en consecuencia trae la incomodidad de los usuarios de la vía, esta presenta la inseguridad del conductor del vehículo que puede realizar maniobras temerarias al encontrarse con este tipo de fallas, esta vía se visualiza en línea recta lo que ocasiona que el conductor incremente la velocidad sin percatarse

de los deterioros del pavimento existente que podría además de causar daño al vehículo ocasionar un accidente.

Además la red vial PE-40 a lo largo de los años ha tenido mayor tráfico vehicular, esto es natural por lo que comprende una vía nacional que conecta con el país de Bolivia y además es utilizado los habitantes de los distritos de Calana y Pachía de la ciudad de Tacna, con muchas utilidades, como ser con lugares turísticos, lugares laborales, de cultura, y comerciales, entre otros; Por lo que se manifiesta el deterioro o desgaste de todas las partes tramo en dicha vía PE-40, dicho esto es que es necesario evaluar y mejorar las condiciones de esta vía nacional.

Conociéndose desde esa perspectiva metodológica e ingenieril de la vía PE-40 para el servicio que presta y la magnitud se puede visualizar en un mal estado, ya que presentan parches, y grietas longitudinales y transversales, desprendimiento del asfalto huecos, depresiones entre otros, encontrándose en diferentes niveles de severidad.

Se tomo como parte del estudio de la vía un tramo de 6484m de con un total de 3804.00 de metros cuadrados que representa una importante zona de estudio, la cual será inspeccionada y evaluada por el método del PCI, junto con la obtención de información con el método de procesamiento de imágenes binarizadas, con el fin de dar a conocer las actividades de solución.

### 1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

#### 1.3.1 Interrogante general

¿Cuál será la condición del pavimento flexible utilizando la metodología del PCI y el procesamiento de imágenes binarios en la red vial nacional tramo: PE-40 KM14+145 – KM20+629, Tacna - 2022?

#### 1.3.2 Interrogantes específicas

¿Cómo determinar el índice de condición del pavimento flexible, usando la metodología del Pavement Condition Index?

¿Cómo se optimizará la recolección de datos de daños en pavimentos de manera semiautomática con el procesamiento de imágenes binarios?

¿Cuál es el estado de conservación del pavimento flexible de la en la red vial PE-40?

### 1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

#### 1.4.1 Hipótesis general

Mediante la evaluación del estado de conservación, del pavimento flexible en la red vial nacional PE-40 KM14+145 – KM20+629, Tacna - 2022” será significativa.

#### 1.4.2 Hipótesis específicas

La determinación del índice de condición superficial del pavimento que se presenta en la red vial nacional PE-40, es deficiente.

La recolección de datos de daños en pavimentos de manera semiautomática con el procesamiento de imágenes binarios es óptima.

El análisis del pavimento flexible permitirá definir el estado actual de red vial PE-40.

#### 1.5 JUSTIFICACIÓN

La evaluación del estado del estado de conservación de una infraestructura vial es importante para evitar sobrecostos de mantenimiento, además de tener sobrecostos de operación vehicular en un rango que se puede ubicar entre 1 y 3% de su producto interno bruto nacional (Bull, 2003). Las vías con un buen desempeño facilitan el intercambio en lo económico, social, cultural, promueve la integración de personas mediante la interconexión con sus alrededores (Wright & Dixon, 2004).

Para una buena conservación de una infraestructura vial, es necesario realizar un correcto mantenimiento, el método convencional de la detección de fallas de pavimentos es realizado mediante inspecciones visuales, lo que implica que la evaluación sea subjetiva, ocasionando falta de confiabilidad en los resultados y por

ende que se produzcan errores en la interpretación de los mismos, distorsionando el resultado final (Berrio & Ussa, 2012).

Por ello se propone realizar la evaluación del pavimento flexible usando índice de condición de pavimento según el PCI e implementar la recolección de datos de manera automática mediante el procesamiento de imágenes binarias.

## 1.6 DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS

### 1.6.1 Objetivo general

- Evaluar la condición de pavimento flexible utilizando la metodología del PCI y el procesamiento de imágenes binarios en la red vial nacional PE-40 tramo: KM14+145 – KM20+629, Tacna - 2022.

### 1.6.2 Objetivos específicos

- Determinar el índice de condición del pavimento flexible, usando la metodología del Pavement Condition Index - PCI.
- Optimizar la recolección de datos de daños en pavimentos de manera semiautomática con el procesamiento de imágenes binarios.
- Analizar el estado de conservación del pavimento flexible de la en la red vial PE-40.

## 1.7 DEFINICIÓN DE VARIABLES

### 1.7.1 Identificación de variables

- Evaluación de la condición del pavimento flexible.
- Método Pavement Condition Index.

### 1.7.2 Caracterización de las variables

#### a) Variables independientes

- Evaluación de la condición del pavimento flexible

#### b) Variables dependientes

- Método Pavement Condition Index

## 1.8 ALCANCES Y LIMITACIONES

### 1.8.1 Alcances

- Para la siguiente investigación se pretende obtener un alcance que pueda brindar un contenido básico, fundamental e innovador para la inspección del pavimento flexible empleando la metodología del PCI a los organismos correspondientes encargadas en desarrollar las vías de importancia y realizar su mantenimiento, además que no cuentan con un inventario de estado vial del pavimento para realizar un adecuado mantenimiento y/o rehabilitación de la que se presenta en esta investigación.

- La presente investigación evaluara la condición del pavimento flexible de la red vial nacional PE-40 tramo: KM14+145 – KM20+629. brindar a los usuarios de una de las carreteras más importantes región de Tacna, el tramo de estudio se encuentra conectados entre los distritos de Calana y Pachía, lo que nos da la importancia que posee en el tránsito esta vía.

#### 1.8.2 Limitaciones

- El presente estudio se ha aplicado únicamente para el caso de la carretera nacional PE-40 que une los distritos de Pachía y Calana, debido a que existen diversas carreteras nacionales y locales cada una con características particulares; sin embargo, de emplearse a otros casos este estudio solo constituye una referencia.
- Los datos obtenidos solo permiten reconocer fallas con características bidimensionales, para un mejor análisis de la evaluación de pavimento se debería de realizar un análisis en tres dimensiones, las cuales se puede obtener utilizando tecnología de mayor precisión como los sensores de altura.
- Se tiene una bibliografía limitada en donde se utilicen las variables propuestas, siendo estas desarrolladas en escenarios internacionales, mas no en el contexto nacional

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 PAVIMENTO**

##### **2.1.1 Tipos de Pavimento**

El deterioro del pavimento flexible viene dado por muchos factores y uno de los principales factores que afectan a la vida útil del pavimento es el factor ambiental que se compone de: Temperatura, régimen de precipitación, precipitación promedio anual, nivel freático, geografía y topografía de la región (Patillo, 1988).

Asimismo, de acuerdo a (Patillo, 1988), hay 03 factores ambientales que afectan el pavimento flexible que son la caída del régimen de agua, los efectos producidos por la temperatura y, finalmente, la combinación de estos dos, agua y temperatura.

##### **2.1.2 Evaluación de pavimentos flexibles**

La objetividad en la evaluación de los pavimentos juega un papel clave, ya que las personas deben estar capacitadas para realizar las evaluaciones, un modelo de evaluación que se ha clasificado para poder decir que se ha llevado a cabo una evaluación verdaderamente objetiva (Patillo, 1988).

No es realmente posible obtener mediciones o índices que cumplan con la condición para comparar dos proyectos debido a la desviación propia de los criterios que se emplea en cada evaluación, por tal motivo se produce una variación entre lo que está expresado en las muestras y la realidad de campo (Patillo, 1988).

Dicha desviación se debe a las siguientes consideraciones:

Variación de todas las unidades de muestreo a inspeccionar, es posible que no se tenga las mismas unidades de muestra que se evaluarán.

Criterio distinto al instante de evaluar en cada muestra, puede ser por una posible rehabilitación en distintos lugares.

### 2.1.3 Tipos de Fallas en el Pavimento

Los deterioros o fallas que existen en el pavimento podemos clasificar teniendo en cuenta su origen como: estructurales o superficiales.

Tenemos como resultado de la clasificación en cuatro categorías:

- Fisuras y grietas
- Deformaciones superficiales
- Desprendimientos.
- Afloramientos o movimientos de material.

Los desprendimientos y afloramientos son producto de fallas funcionales y como tales se presentan en las capas superiores del pavimento, los agrietamientos o

roturas y deformaciones dan indicios de fallas estructurales y se presentan en las capas inferiores del pavimento (Vásquez, 2002).

#### a) Fallas superficiales

Son aquellos defectos que se manifiestan en la superficie del pavimento, y son medibles sin la necesidad de equipos especiales, estos defectos tienen una importancia relativa en la serviciabilidad del pavimento, sin embargo, su detección oportuna es importante debido a que permite prevenir el posible desencadenamiento de un deterioro acelerado y/o establecer un diagnóstico más preciso de las causas que originan el deterioro (Vásquez, 2002).

Es importante, por lo tanto, efectuar un adecuado reconocimiento y cuantificación de estas fallas. Esto se realiza mediante una inspección visual empleando fichas diseñadas especialmente para este efecto. Estas fichas según la importancia del proyecto pueden ser elaboradas con diferentes grados de detalle (Vásquez, 2002).

#### b) Fallas estructurales

Son fallas graves, ya que involucran al paquete estructural, se originan cuando se produce la falla estructural en una o varias capas del pavimento, lo que ocasiona el rompimiento del mismo (Vásquez, 2002).

Estos deterioros afectan significativamente la capacidad de soportar las solicitaciones para las cuales fue diseñado inicialmente el pavimento, tales como:

cargas impuestas por el tráfico y condiciones ambientales, estas fallas pueden detectarse por simple inspección visual, aunque en algunos casos se hace necesario realizar ensayos destructivos y/o ensayos no destructivos. (Gamboa, 2012).

## 2.2 MÉTODO DEL PCI (Índice de Condición del Pavimento)

### 2.2.1 Método PCI

El deterioro de la estructura del pavimento es una función del tipo de daño, su gravedad y su cantidad o densidad, la formulación de un índice que tomó en cuenta los tres factores mencionados ha sido problemática debido al gran número de condiciones posibles (Vásquez, 2002).

Para superar esta dificultad, se introdujeron los "valores deducidos", como un arquetipo del factor de ponderación, con el fin de indicar el grado de afectación que cada combinación de clase de daño, nivel de severidad y densidad tiene sobre la condición del pavimento (Vásquez, 2002).

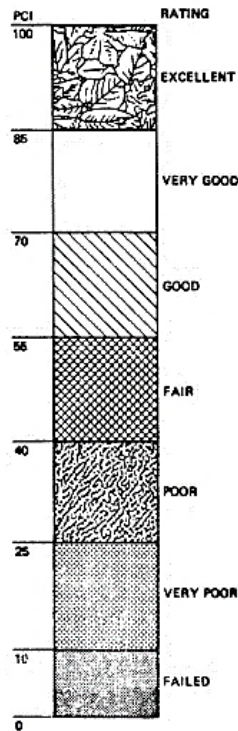
En lo siguiente, se muestra en la tabla N°01 los parámetros a considerarse para la determinación del PCI con su descripción cualitativa de la condición del pavimento en que se encuentra.

**Tabla 1**  
*Escala de Clasificación del PCI.*

<b>Pavement Condition Index</b>	<b>Clasificación</b>
85-100	Excelente
70-85	Muy bueno
55-70	Bueno
40-55	Regular
25-40	Malo
10-25	Muy malo
0-10	Fallado

*Fuente. ASTM, 2007.*

Los datos de los daños provienen como parte del inventario que ofrece una clara demostración de las causas del daño, en la siguiente figura se muestra gráficamente los niveles de condición del pavimento.



*Figura 1. Escala de Clasificación del PCI.*  
*Fuente. ASTM, 2007.*

### 2.2.2 Procedimiento para la evaluación del PCI

La primera etapa corresponde al trabajo de campo en el que el daño se identifica teniendo en cuenta la clase, la gravedad y la extensión de la misma, esta información se registra en formatos adecuados para este fin (Riasco, 2012).

#### 1. Unidades de Muestreo

Según (Riasco, 2012), indica que las unidades de muestreo se dividen en secciones o "unidades de muestreo", cuyas dimensiones varían de acuerdo con los tipos de pista y banda de rodadura donde; las carreteras con huella de asfalto y anchura inferior a 7,30 m: el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango de  $230.0 \pm 93.0 \text{ m}^2$ .

**Tabla 2**  
*Longitudes de Muestreo Asfálticos*

<b>ANCHO DE CALZADA (m)</b>	<b>LONGITUD DE LA UNIDAD DE MUESTREO (M)</b>
5.0	46.0
5.5	41.8
6.0	38.3
6.5	35.4
7.3 (máximo)	31.5

*Fuente: (Vásquez, 2002),*

#### 2. Determinación de las Unidades de Muestreo para Evaluación

(Vásquez, 2002), explica que en la "Evaluación de una red de carreteras" se puede tener una gran cantidad de unidades de muestreo cuya inspección requerirá un

tiempo y recursos considerables; por lo tanto, es necesario aplicar un proceso de muestreo.

Para la evaluación de trabajo debe considerarse todas las unidades ser inspeccionadas; pero si esto si esta es mayor y no es factible realizarlo entonces, el número mínimo de unidades de muestreo se calcula mediante la ecuación número 1, que determina una estimación adecuada del PCI  $\pm 5$  esta será expresada con un grado de confiabilidad del 95%.

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

Donde:

n: Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

N: Número total de unidades de muestra del tramo de pavimento.

e: Error admisible estimado del PCI con un valor de  $e = 5\%$ .

$\sigma$ : indica la desviación estándar del PCI.

Se determina un valor de N dividiendo la longitud total del tramo de la vía de estudio entre la longitud de unidad de muestra, así nos proporciona el número total de las unidades de muestra.

$$N = \frac{\text{Longitud total de la vía (m)}}{\text{longitud de la unidad de muestra (m)}} \quad (2)$$

Donde:

N: Número total de unidades de muestreo en la en la vía asfáltica en estudio.

### 3. Selección de las Unidades de Muestreo para Inspección:

Se procede a calcular un intervalo de muestreo  $i$ , por lo tanto, se aplicará la siguiente ecuación.

$$i = \frac{N}{n} \quad (3)$$

Donde:

$n$ : número mínimo de unidades de muestra.

$N$ : número total de unidades de muestra disponible.

$i$ : intervalo de muestro.

### 4. Clasificación de las Unidades de Muestreo Adicionales:

Uno de los mayores inconvenientes del método aleatorio es la exclusión del proceso de inspección y evaluación de algunas unidades de muestreo en muy mal estado, además puede suceder que unidades de muestreo que tienen daños que sólo se presentan una vez (por ejemplo, “cruce de línea férrea”) queden incluidas de forma inapropiada en un muestreo aleatorio (Vásquez, 2002).

Para evitar lo anterior, la inspección deberá establecer cualquier unidad de muestreo inusual e inspeccionarla como una “unidad adicional” en lugar de una “unidad representativa” o aleatoria, cuando se incluyen unidades de muestreo adicionales, el cálculo del PCI es ligeramente modificado para prevenir la extrapolación de las condiciones inusuales en toda la sección. (Vásquez, 2002)

## 5. Determinación del PCI de las unidades de muestreo

Una vez terminada la evaluación de pavimento en campo, la información de los daños se utiliza para determinar el PCI. El cálculo se puede realizar de manera manual o automatizado y se fundamenta sobre los “Valores Deducidos” de cada tipo de daño considerando la cantidad y su respectiva severidad.

Etapas 1. Cálculo de los Valores Deducidos:

1a. Después de obtener el total de cada tipo y su nivel de gravedad de daño se registra en la columna total del formato PCI. El daño se mide en unidades de área, longitud ó por número, según sea el tipo de daño.

1b. Se divide la cantidad de daño, en cada nivel de severidad, entre el área total de todas las unidades de muestreo y se expresa el resultado final como un porcentaje.

1c. Se calcula el valor deducido para el tipo de daño además de su nivel de severidad con las curvas mencionadas “Valor Deducido del Daño” que se proporcionan al final de este documento, de acuerdo con el tipo de pavimento evaluado.

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

2a. En el caso que tan sólo uno ó ninguno de los “Valores Deducidos” es mayor que 2 entonces, se usa el “Valor Deducido Total” en contrariedad del mayor “Valor Deducido Corregido”, CDV, lo obtenido en el Paso 4. Por lo contrario, se deben seguir los pasos 2b. y 2c

2b. Enumerar los valores deducidos individuales.

2c. Se calcula el “Número Máximo Admisible de Valores Deducidos” ( $m$ ).

Ecuación 4.

$$m_i = 1.00 + \frac{9}{98}(100 - HDV_i) \quad (4)$$

donde:

$m_i$ : Representa el número máximo admisible de “valores deducidos”, incluyendo fracción, para la unidad de muestreo  $i$ .

$HDV_i$ : es el mayor valor deducido individual para cada unidad de muestreo

Paso 3. Determinación del Máximo Valor Deducido Corregido (CDV).

El valor de máximo CDV se obtiene mediante el siguiente procedimiento iterativo:

3a. Se debe de calcular el número de valores deducidos, que mayores que 2.0.

3b. El “Valor Deducido Total” se debe de determinar sumando todos los valores deducidos por tipo de falla y severidad.

3c. Debemos de determinar el CDV con  $q$  y el Valor Deducido Total en el ábaco de corrección correspondiente al tipo de pavimento.

3d. Se debe de reducir a 2.0 el menor de los Valores Deducidos que son individuales y que sea mayor que 2.0 además se repita las etapas 3a. a 3c. hasta que se obtenga el valor de uno.

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

Paso 4. Se calcula el PCI de la unidad restando de 100 el máximo CDV obtenido en la Etapa 3. (Vásquez Varela, 2002, p. 7)

### 2.2.3 Cálculo del PCI de una sección de pavimento

Una sección de pavimento abarca varias unidades de muestreo. Si todas las unidades de muestreo son inventariadas, el PCI de la sección será el promedio de los PCI calculados en las unidades de muestreo (Vásquez, 2002).

Si se utilizó la técnica del muestreo, se emplea otro procedimiento. (Vásquez, 2002). Indica que, si la selección de las unidades de muestreo para inspección se hizo mediante la técnica aleatoria sistemática o con base en la representatividad de la sección, el PCI será el promedio de los PCI de las unidades de muestreo inspeccionadas. Si se usaron unidades de muestreo adicionales se usa un promedio ponderado calculado de la siguiente forma:

Ecuación 4.

$$PCI_s = \frac{[(N - A) \times PCI_R] + (A \times PCI_A)}{N} \quad (5)$$

Donde:

PCIS : PCI de la sección del pavimento asfáltico

PCIR : PCI promedio de unidades de muestra representativas o aleatorias

PCIA : PCI promedio de las unidades de muestreo adicionales

N : Representa el número total de unidades de muestreo.

A : Número adicional de unidades de muestreo inspeccionadas (Vásquez Varela, 2002, p. 8)

#### **2.2.4 Evaluación de la Condición**

El procedimiento varía según el tipo de superficie de pavimento que se esté inspeccionando, la definición de daño en este manual debe seguirse estrictamente para obtener un valor PCI confiable, además la evaluación de la condición contiene las siguientes características (Díaz, 2014):

##### **a. Instrumentos y Equipo.**

- Odómetro manual para medir las unidades de muestras y los daños longitudinales y áreas de daño.
- Una cinta métrica y regla para establecer la altura de las profundidades de los baches o huecos o fallas ondulatorias.
- Apuntes de los daños establecidos por el PCI con los cuadros y formatos para el desarrollo de la inspección del pavimento.
- Procedimiento de recopilación de información.

Se debe inspeccionar una unidad de muestreo para medir el tipo de severidad, la cantidad y el grado de daño de acuerdo con lo indicado en la norma ASTM, y la información se registra en el formato proporcionado por el PCI.

Las definiciones y procedimientos para medir el daño deben ser estrictamente conocidos y seguidos. Se utiliza un formulario o "hoja de información de exploración de condición" para cada unidad de muestreo y en los formatos se usa cada fila para registrar un daño, su extensión y nivel de gravedad.

Los equipos de inspección.

Para la evaluación del pavimento se debe considerar todas las medidas de seguridad para su desplazamiento en la vía en evaluación, como instrumentos de señalización, señales de advertencia para el vehículo que toma las fotografías y para el personal que registra las fallas en el pavimento.

Debe implementar todas las medidas de seguridad para su deslizamiento en la carretera inspeccionada, como dispositivos de señalización y advertencia para el vehículo que lo acompaña y para el personal en la carretera.

#### 2.2.5 Tipos de fallas en un pavimento flexible considerados por el método del PCI.

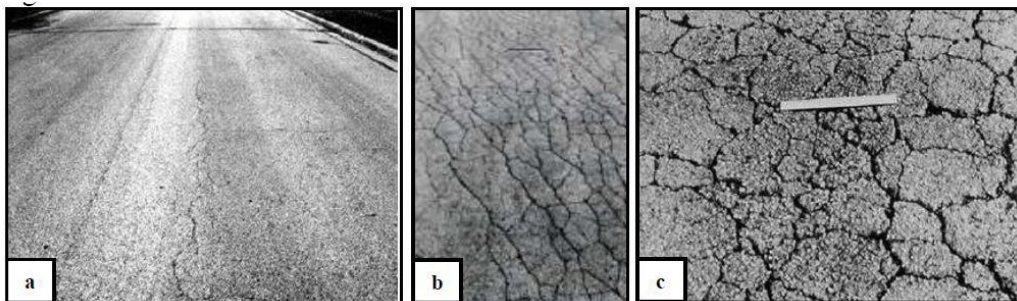
Posteriormente, se detallan las fallas de los pavimentos flexibles según la ASTM considerados en la evaluación de PCI indicando los tres niveles de: Bajo, Medio y Alto que corresponden a cada tipo de falla que existe y que proporcionan una medición en la calidad del pavimento asfáltico.

##### 1. Piel de cocodrilo

La falla de Piel de Cocodrilo es un tipo de grieta que esta interconectadas en formas de polígonos irregulares, puede ser de hasta 0.5 m en el lado más largo de longitud.

Según Rodriguez Velasquez (2009) también lo denomina agrietamiento por fatiga, la piel de cocodrilo se produce en áreas sujetas a repeticiones de carga de tráfico, tales como las huellas de las llantas de los vehículos, el agrietamiento se origina en el fondo del paquete asfáltico, en la base, donde los esfuerzos y deformaciones unitarias de tensión son elevados de ahí, las grietas se propagan hacia la superficie como una serie de fisuras longitudinales paralelas, que luego se conectan formando varias piezas.

“La piel de cocodrilo indica la pérdida de la capacidad estructural del pavimento, pues disminuye su capacidad de resistencia frente a sollicitaciones externas. cuadrados del área afectada” (Rodriguez Velasquez, 2009).



*Figura 2. Piel de cocodrilo con distintos niveles de severidad.  
Fuente: (Vásquez, 2002)*

## 2. Exudación

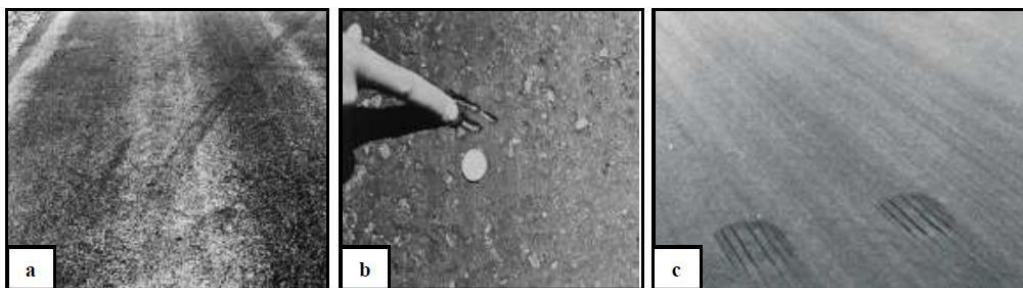
Esta falla es provocada por un exceso de asfalto en la mezcla asfáltica que se prepara en el proceso constructivo, es básicamente una lámina de material bituminoso en la superficie del pavimento.

Se tiene el nivel de severidad bajo donde la exudación ha ocurrido solo en un grado muy leve y es detectable solo durante unos pocos días del término de su construcción.

Para el nivel de severidad medio se considera que se ha tenido el asfalto hasta un punto en el que se adhiere a las llantas de los vehículos.

Cuando se presenta inmensas cantidades de asfalto que se adhieren a las ruedas de los vehículos se denomina nivel alto.

Para su medición se realiza en pies cuadrados (o metros cuadrados) en el área de estudio.



*Figura 3. Exudación con distintos niveles de severidad.*

*Fuente: (Vásquez, 2002)*

### 3. Agrietamiento en bloque

Las fisuras en bloque son grietas interconectadas que forman piezas rectangulares de tamaño variable, desde aproximadamente 0.30 x 0.30 m hasta 3.00 x 3.00 m. Este tipo de falla puede ocurrir sobre porciones largas del área del pavimento o sobre aquellas áreas donde no hay tráfico; es por ello que las fisuras en bloque no están asociadas a sollicitaciones externas de carga vehicular. Las grietas en bloque son causadas principalmente por la contracción del concreto asfáltico y por la variación de temperatura, que origina ciclos diarios de esfuerzo / deformación unitaria. Esta falla indica que el asfalto se ha endurecido significativamente Rodríguez Velasquez (2009).



*Figura 4. Agrietamiento en Bloque con distintos niveles de severidad.  
Fuente: (Vásquez, 2002)*

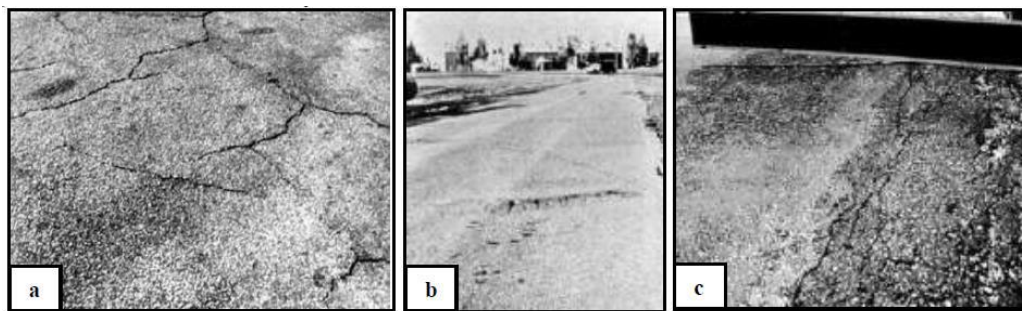
#### 4. Abultamientos y hundimientos

“Los abultamientos y hundimientos son desplazamientos pequeños, bruscos, hacia arriba y hacia abajo de la superficie del pavimento, que distorsionan el perfil de la carretera” (Rodríguez Velasquez, 2009).

“No son causados por inestabilidad del pavimento, sino que pueden ser producto de varios factores, tales como” (Rodríguez Velasquez, 2009).

La existencia la acumulación de material y de infiltración en una grieta en combinación con cargas de tráfico.

Mala eficiencia en el drenaje de la capa estructural del pavimento.



**Figura 5.** Abultamientos y hundimientos con distintos niveles de severidad.  
Fuente: (ingepav, 2002)

## 5. Corrugación

Estos tipos de falla son causados por acción de la carga del tránsito así lo estipula Rodríguez Velasquez (2009) donde menciona que la corrugación es una serie de ondulaciones constituidas por cimas y depresiones muy cercanas entre sí y espaciadas a intervalos bastante regulares (generalmente menores a 3.00 m) a lo largo del pavimento (Rodríguez Velasquez, 2009).

“Las cimas son perpendiculares al sentido del tránsito. Este tipo de falla es causada por la acción del tránsito vehicular combinada con la inestabilidad de las capas superficiales o de la base del pavimento”.



**Figura 6.** *Corrugación con distintos niveles de severidad.*  
Fuente: (ingepav, 2002)

## 6. Depresión

Fallas producidas por hundimiento de la sub rasante o empozamiento de agua en las capas también conceptualizo Rodriguez Velasquez (2009) que las depresiones son áreas localizadas en la superficie del pavimento que poseen niveles de elevación ligeramente menores a aquellos que se encuentran a su alrededor. Las depresiones son visibles cuando el agua se empoza dentro de ellas después de la caída de lluvia, o, a través de las manchas causadas por el agua empozada, en caso de superficies secas. Son producidas por asentamientos de la subrasante o debido a procedimientos constructivos defectuosos. Pueden causar alguna rugosidad en la superficie de la pista.

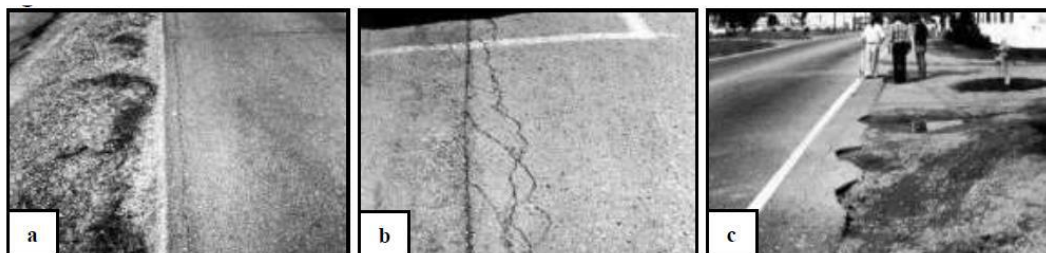


**Figura 7.** *Depresión con distintos niveles de severidad.*  
Fuente: (ingepav, 2002)

## 7. Grieta de borde

“Las fisuras de borde son grietas paralelas al borde externo del pavimento, que se encuentran a una distancia de 0.30 a 0.50 m de éste” (Rodriguez Velasquez, 2009).

Generalmente es origina al ser debilitado según el siguiente concepto de (Rodriguez Velasquez, 2009) ese tipo de grieta se incrementa por la carga de tránsito que se origina debido al debilitamiento de la base o de la subrasante en áreas muy próximas al borde del pavimento, a causa de condiciones climáticas o por efecto abrasivo de arena suelta en el borde, que provoca peladuras que conducen a la desintegración.



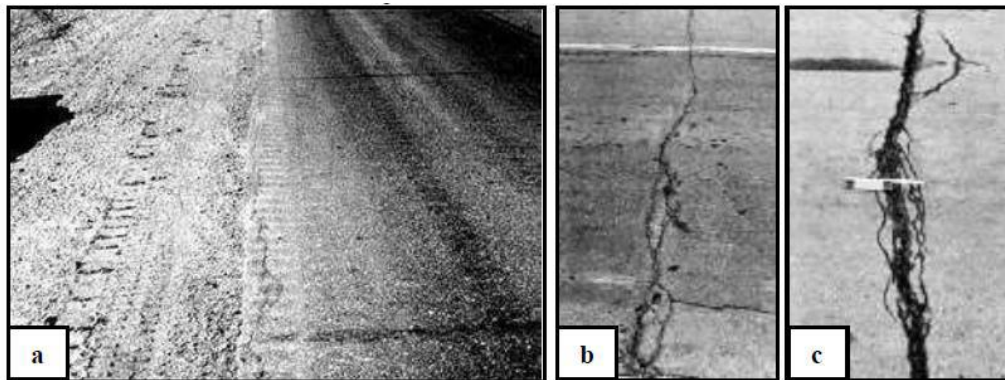
**Figura 8.** Grieta de Borde con distintos niveles de severidad  
Fuente: (Vásquez, 2002)

## 8. Grietas de reflexión de junta (de losas de concreto de Cemento Portland)

Fallas usualmente en pavimentos mixtos o pavimentos puesto sobre pavimento rígido así lo estipula Rodriguez Velasquez (2009) Las fisuras de reflexión de junta ocurren solamente en pavimentos mixtos: pavimentos de superficie asfáltica (flexible) construidos sobre una losa de concreto (rígido).

“No se consideran fisuras de reflexión de otros tipos de base como bases estabilizadas con cemento o cal. Estas grietas son causadas por el movimiento de la

losa de concreto, inducido por temperatura o humedad, bajo la superficie de pavimento flexible” Rodríguez Velasquez (2009).



*Figura 9. Grieta de Reflexión de Junta con distintos niveles de severidad.  
Fuente: (ingepav, 2002)*

#### 9. Desnivel carril / berma

Es una diferencia de altura (niveles) que existe entre el borde del pavimento y la berma.

Esta falla es normalmente causada por el asentamiento y la erosión de la berma del pavimento asfáltico

Su método de medición se realiza en metros lineales para las evaluaciones de pavimentos.



**Figura 10.** Desnivel de carril/berma con distintos niveles de severidad.  
Fuente: (Vásquez, 2002)

## 10. Grietas longitudinales y transversales

“Las fisuras longitudinales son grietas paralelas al eje de la vía o a la línea direccional en la que fue construida. Las grietas transversales, en cambio, son perpendiculares al eje del pavimento o a la dirección de construcción” (Rodríguez Velasquez, 2009).

Los daños que se tiene en las grietas longitudinales y transversales no están asociados con el peso del vehículo, estas fallas pueden ser causados por:

Juntas en el proceso constructivo pobremente construidas, o es su defecto su ausencia.

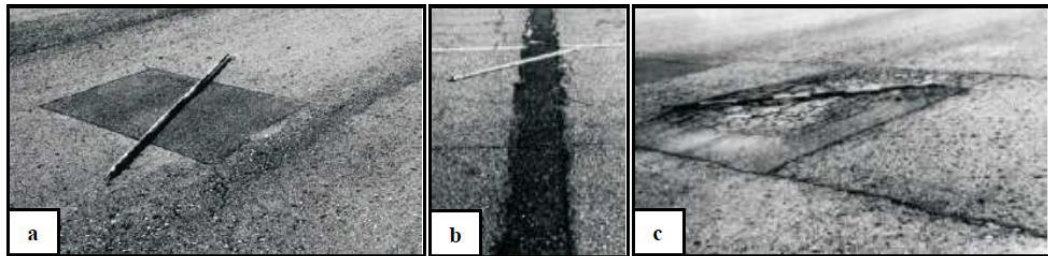
Contracción del concreto asfáltico debido a altas o bajas temperaturas.

Utilización de ligantes (asfaltos) inadecuados o muy duros o vencidos.

Gradiente térmico muy por encima de los 30° C que llega a producir ciclos de expansión - contracción de la mezcla asfáltica.

## 11. Parcheo y acometidas de servicios públicos

Son fallas producidas por haber parchado una determinada área del pavimento también dice Rodriguez Velasquez (2009) Un parche es un área del pavimento, que, por encontrarse en mal estado, ha sido reemplazada con material nuevo con el fin de reparar el pavimento existente. Los parches de cortes utilitarios hacen referencia a aquellos parches colocados cuando se efectúan cortes para la reparación de tuberías de agua o desagüe, instalación del cableado eléctrico, teléfonos, entre otros trabajos similares.



*Figura 11. Parches con distintos niveles de severidad.  
Fuente: (ingepav, 2002)*

## 12. Pulimiento de agregados

“El agregado pulido es la pérdida de resistencia al deslizamiento del pavimento, que ocurre cuando los agregados en la superficie se vuelven suaves al tacto” (Rodriguez Velasquez, 2009).

En este tipo de falla no se establece la manera de identificarlo tiene que ser claramente visible al tacto en campo.

Para su medición se establece como unidad de medida en metros cuadrados. Si de la muestra se presencia la falla de exudación, se debe considera solo esta falla y ya no la presencia de agredo pulido.



*Figura 12. Pulimiento de agregados sin clasificación de severidad definido.  
Fuente: (Vásquez, 2002)*

### 13. Huecos

“Los baches son pequeños hoyos (depressiones) en la superficie del pavimento de diámetro menor a 750 mm. Presentan bordes agudos y lados verticales cerca de la zona superior de la falla” (Rodríguez Velasquez, 2009).

Este tipo de fallas son causados a consecuencia de los siguientes factores:

Presencia de fisuras tipo piel de cocodrilo muy severos, que causa fatiga y provoca la desintegración de la superficie del pavimento.

Por defectos constructivos durante la ejecución de la obra.

Existencia de subdrenaje no adecuado a lo largo de la vía.

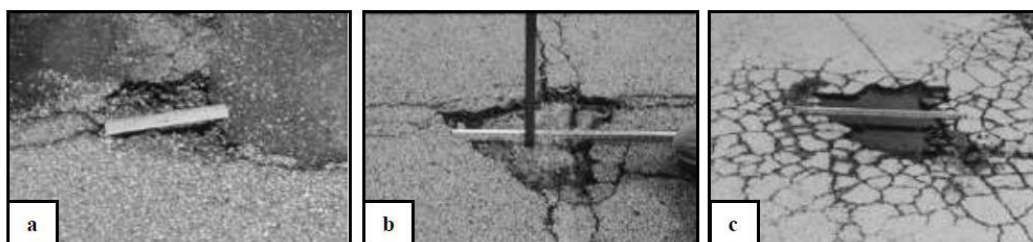
No existe un diseño de las capas estructurales estructural., si la profundidad es superior a 25 milímetros, la gravedad se considera alta.

**Tabla 3**  
*Longitudes de Asfálticos*

Profundidad máxima del hueco	Diámetro medio (mm)		
	102 a 203 mm	203 a 457 mm	457 a 762 mm
12.7 a 25.4 mm	L	L	M
>25.4 a 50.8 mm	L	M	H
>50.8 mm	M	M	H

*Fuente: (ingepav, 2002)*

Para su medición se realiza contando aquellos que sean de severidades baja, media y alta, y registrándolos en un formato PCI.



**Figura 13.** Huecos con distintos niveles de severidad.  
*Fuente: (Vásquez, 2002)*

#### 14. Cruce de vía férrea

- La característica principal de esta falla de pavimento es que son los efectos de abultamiento o hundimiento que se pueden provocar en las zonas de cruce de la vía ferroviaria.

Se tiene entiendo por un nivel de severidad bajo cuando el cruce de vía férrea muestra un impacto de tránsito bajo. figura 14a.

Para el nivel de severidad medio esta considerado dentro de este rango cuando el cruce de vía férrea provoca un impacto de tránsito medio. figura 14b.

Cuando se tiene un nivel de severidad alto se indica que en este rango es cuando el cruce de vía férrea provoca un impacto de tránsito alto. figura 14c.

Se miden en metros cuadrados o pies cuadrados para su evaluación.



**Figura 14.** Cruce de vía férrea con distintos niveles de severidad.  
Fuente: (Vásquez, 2002)

## 15. Ahuellamiento

“El ahuellamiento es una depresión longitudinal continua a lo largo de la trayectoria del vehículo, que trae como consecuencia la deformación permanente en cualquiera de las capas del pavimento o subrasante” (Rodríguez Velasquez, 2009).

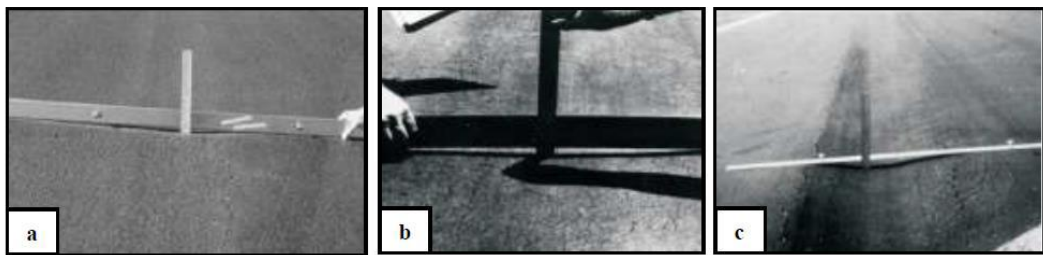
También se indica de acuerdo a Rodríguez Velasquez (2009) Esta falla puede ser causada por una pobre compactación del paquete estructural, lo que origina inestabilidad en las capas (bases, subbases) permitiendo el movimiento lateral de los materiales debido a las cargas de tráfico. Un ahuellamiento importante puede conducir a una falla estructural considerable del pavimento. Otras causas son:

Mezcla asfáltica no estable durante el proceso constructivo.

Demasía de ligante en riegos en obra.

Diseño no adecuado del paquete estructural del pavimento: espesores deficientes.

Pésima calidad de materiales o ineficiente control de calidad en el proceso constructivo.



*Figura 15. Ahuellamiento con distintos niveles de severidad.  
Fuente: (Vásquez, 2002)*

## 16. Desplazamiento

“Los desplazamientos son distorsiones de la superficie originados por desplazamientos de mezcla. Son corrimientos longitudinales y permanentes de un área localizada del pavimento formando una especie de “cordones” laterales” (Rodriguez Velasquez, 2009).

“Estas fallas son producidas por acción de la carga de tráfico, que

empuja contra el pavimento produciendo una onda corta y brusca en la superficie del mismo. Esta falla normalmente ocurre en pavimentos con mezclas de asfalto líquido inestables” (Rodríguez Velasquez, 2009).

“También ocurren desplazamientos cuando los pavimentos asfálticos colindan con pavimentos rígidos. Las losas de concreto al aumentar su longitud empujan al pavimento flexible produciéndose el desplazamiento” (Rodríguez Velasquez, 2009).

Otras causas que pueden existir son:

Exceso de asfalto en el proceso constructivo o de vacíos constituyendo así unas mezclas inestables.

Ausencia de confinamiento lateral de la vía.

Falta de Adherencia adecuada por defectos en el riego de liga o de imprimación dentro del proceso constructivo.



**Figura 16.** Desplazamiento con distintos niveles de severidad.  
Fuente: (Vásquez, 2002)

## 17. Grieta parabólica

Según la descripción de Rodríguez Velasquez (2009) Las fisuras parabólicas ó por deslizamiento son grietas en forma de media luna, que se presentan de manera transversal a la dirección del tránsito. Estas fallas ocurren generalmente en mezclas asfálticas de baja estabilidad o en capas superpuestas, cuando existe una adherencia pobre (liga pobre) entre la capa superficial y la capa subyacente de la estructura del pavimento.

Las grietas parabólicas suelen ser causadas por los factores siguientes:

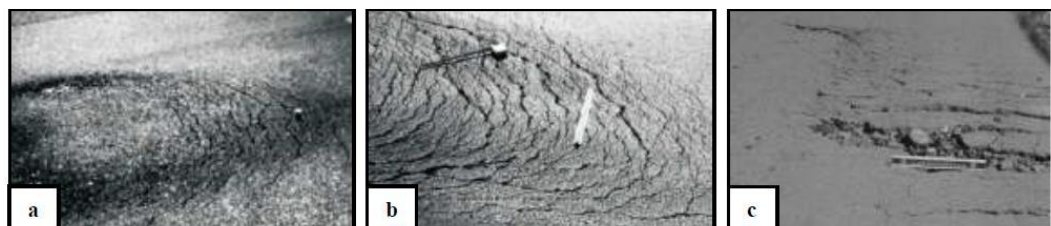
Frenado brusco de las ruedas de los vehículos o giros por un cambio de dirección, originando así el deslizamiento y deformación de la superficie del pavimento.

Pésima adherencia de las capas de pavimento superpuestas o presencia de polvo.

Exceso de ligante a la hora de la construcción o falta de mayor cantidad de riego de liga.

Mayor presencia de contenido de arena fina en la mezcla durante su construcción.

Este daño no está relacionado con algún con procesos de inestabilidad geotécnica en el suelo que contiene a las capas del pavimento.



*Figura 17. Grieta parabólica con distintos niveles de severidad.  
Fuente: (Vásquez, 2002)*

## 18. Hinchamiento

“El hinchamiento es el abultamiento o levantamiento localizado en la superficie del pavimento, en forma de una onda larga y gradual de longitud mayor a 3.00 m, que distorsiona el perfil de la carretera” (Rodríguez Velasquez, 2009).

“La causa principal de este tipo de falla es la expansión del suelo de fundación (suelos expansivos) y el congelamiento del material de la subrasante” (Rodríguez Velasquez, 2009).

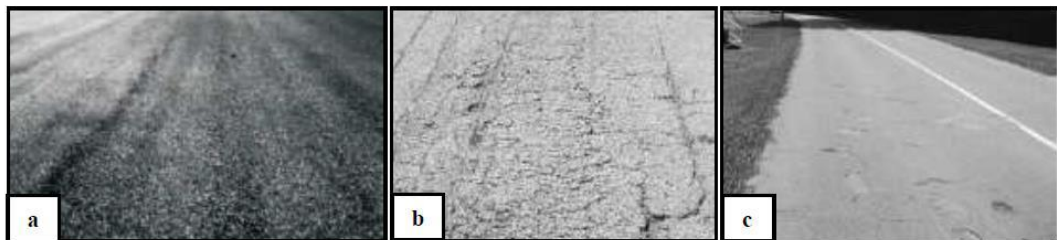


**Figura 18.** Hinchamiento severidad alta.  
Fuente: (Vásquez, 2002)

## 19. Desprendimiento de agregados

“La peladura por intemperismo es la desintegración superficial del pavimento por pérdida de ligante asfáltico; mientras que el desprendimiento del agregado pétreo hace referencia a partículas de agregado sueltas o removidas” (Rodríguez Velasquez, 2009).

“Ambas fallas indican que el ligante asfáltico ha sufrido un endurecimiento considerable o que la mezcla es de pobre calidad” (Rodríguez Velasquez, 2009).



*Figura 19. Peladura con los diversos niveles de severidad.  
Fuente: (Vásquez, 2002)*

## 2.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES BINARIOS PARA LA EVALUACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

### 2.3.1 Herramienta de desarrollo

En el presente proyecto de investigación, para los conceptos de la binarización de imágenes y obtención de datos a través de la segmentación de objetos en las imágenes binarias se ha utilizado la herramienta de software Matlab en su versión R2020a (9.8.0.13.23502), la cual nos permite obtener datos a partir de procesamiento de imágenes utilizando los algoritmos de esta herramienta basada en códigos proporcionados por el mismo software.

Hasta el momento se han desarrollado una gran cantidad de algoritmos de segmentación como los algoritmos de detección de bordes donde se considerará como el grupo de pixeles que existe entre dos secciones similares en una imagen.

A lo largo del borde, la función  $f(x,y)$  que describe a una fotografía experimenta un cambio en su valor de escala de grises (Alvarado , 2012), de modo que matemáticamente estos cambios pueden ser detectados y aislados usando derivadas de primer y segundo orden.

En la identificación de deterioros superficiales de una carretera, el uso de algoritmos de borde se ha vuelto una práctica común, puesto que el trazo de una grieta superficial constituye por sí misma un borde que separa del resto de la carretera (Herra, 2018).

La mayoría de grietas en imágenes de pavimento se encuentran con objetos no deseados y desconectadas. Para resolver este problema (Porras et al., 2012) establece que se aplica el filtro mediano, para el suavizado de la imagen; el ajuste de contraste en cada imagen y procesada a través de los algoritmos, utilizando el entorno de desarrollo de Matlab.

### 2.3.2 Procedimiento de captación de imágenes

En la Figura 20 se ilustran las etapas que se sigue en la presente investigación para llevar a cabo el procesamiento de imágenes binarios para su interpretación.



*Figura 20. Etapas del procesamiento digital de imágenes*  
*Fuente: Propia*

Se debe tener en cuenta que al inicio se debe obtener las imágenes del pavimento que serán procesadas y analizadas. Por efectos de obtener dicha información de identificación de fallas superficiales en la vía, los vehículos de reconocimiento son de un equipo muy valioso, pues nos facilita obtener un registro continuo (imágenes o video), capturar de manera rápida y sin peligros diversos deterioros presentes en la superficie del pavimento, esta herramienta es que permite cumplir de manera eficiente con esta primera etapa del procesamiento de imágenes para su posterior evaluación.

### 2.3.3 Mejora de Imágenes Digitales (Preprocesamiento)

Esta etapa se realiza con el propósito de identificar y eliminar aquellas fallas que puedan existir en la imagen, para mejorarla, y que consecuentemente su análisis sea más sencillo (La Serna y Concha, 2009). Esta aplicación de filtros de mediana es una de los algoritmos más utilizadas para mejorar las imágenes de los pavimentos.

Esta técnica permite homogenizar todos aquellos pixeles de una imagen que cuentan con niveles de gris muy distintos a sus pixeles adyacentes (Ouyang et al., 2011). Una de las principales ventajas que trae consigo la aplicación de filtros de mediana, es el hecho de que esta técnica permite mejorar la imagen sin la necesidad de eliminar sus bordes o principales rasgos, permitiendo su posterior análisis (Chandel y Gupta 2013). Adicionalmente, a pesar de que el fundamento teórico de esta técnica puede ser complejo, actualmente hay muchos programas

computacionales que permiten realizar este trabajo a partir de funciones preprogramadas. El software MathLab posee una función propia que mediante el comando “medfilt2(A)” permite realizar filtros de mediana obteniendo resultados como los que se detallan en la Figura 21, donde se muestra como la imagen con una escala de gris fue modificada, distinguida de los demás objetos además se observa que fueron homogenizados con el resto de la imagen sin perder la esencia de la fotografía o una pérdida de información valiosa en la fotografía.



*Figura 21. imagen digital donde se utiliza el filtro de mediana*

#### 2.3.4 Segmentación de Imágenes Digitales

Se denomina segmentación de imágenes digitales al proceso que se extraen de contexto aquellos objetos de la imagen que no son parte del análisis de estudio, con el propósito de dar mayor importancia a objetos de interés en la fotografía; Por lo cual, hasta la actualidad se han desarrollado una gran cantidad de algoritmos de segmentación. En la presente investigación, se aplicaron los algoritmos brindados por el software Matlab y estos algoritmos nos permite la detección de fallas según el PCI en la superficie de pavimento flexible.

Algoritmos de detección de bordes: Un borde se puede conceptualizar como el grupo de píxeles que existe entre dos partes homogéneas en una imagen. A lo largo del borde, la función  $f(x,y)$  que describe a una fotografía experimenta un cambio en su valor de escala de grises (Alvarado, 2012), de modo que matemáticamente estos cambios pueden ser detectados y aislados usando derivadas de primer y segundo orden.

Para la identificación de deterioros superficiales de una vía asfaltada, el uso de algoritmos de borde se ha vuelto una práctica necesaria y común, ya que una grieta de pavimento se establece por sí misma un borde. En la figura 22 nos muestra una grieta procesada a partir de un filtro de mediana, que luego con la aplicación de un algoritmo de borde fue separada del resto de la vía pudiéndose así visualizar de manera clara la falla del pavimento.

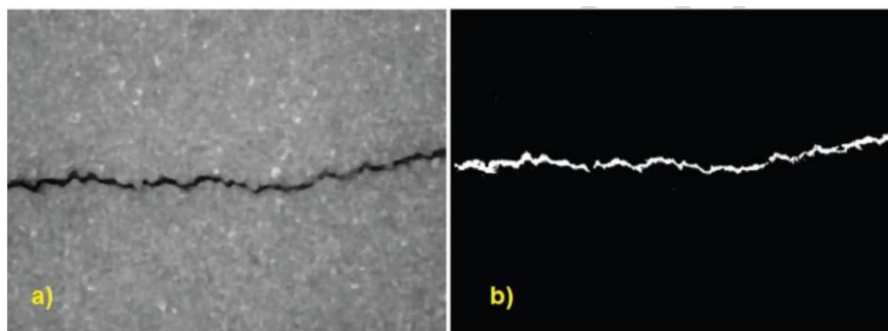


Figura 22. Grieta procesada a partir de un filtro de mediana y posteriormente a partir de un algoritmo de borde  
Fuente: (Herra, 2018)

La detección de huecos requiere de técnicas como la umbralización para poder ser cuantificados de manera automatizada, debido a que por sus características geométricas el uso de algoritmos de borde no es suficiente.

(Herra, 2018) define la Umbralización como uno de los métodos más importantes de la segmentación de imágenes, ya que permite, a partir condiciones aplicadas a los valores de intensidad de gris que componen a una imagen, extraer áreas de una fotografía. Por ejemplo, si se define  $f(x,y)$  como la imagen original,  $g(x,y)$  como la imagen umbralizada y 125 como el valor umbral medido en nivel de gris, es posible a partir de la ecuación (1) extraer el óvalo negro mostrado en la Figura 7.



Figura 23. Ejemplo de segmentación mediante umbralización  
Fuente: (Herra, 2018)

De forma análoga al ejercicio mostrado, es posible mediante algoritmos de umbralización identificar de manera automatizada huecos en la superficie de un pavimento. Por ejemplo, Koch et al. (2013), a partir del uso de algoritmos para la detección de borde y umbralización, logró identificar satisfactoriamente la ubicación de huecos en una superficie de pavimentos, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 8.



*Figura 24. Detección de huecos a partir de algoritmos de detección de borde y Umbralización  
Fuente: (Herra, 2018)*

De acuerdo a lo anterior, al emplear la información que se pueda generar de la etapa de segmentación es posible caracterizar los deterioros encontrados, desarrollar bases de datos con un registro de necesidades de mantenimiento y a partir de ello establecer criterios de intervención que le permitan a la Administración costarricense mejorar la eficiencia en cuanto a la inversión que realiza a la red vial nacional.

Para la conversión de imágenes en escala de grises siendo establece que la intensidad de gris de 0 como color negro y los cercanos a 255 con el color blanco.

La cámara digital fue ubicada a un extremo posterior del vehículo adaptado para la captura de imágenes, y se ubicó en posición ortogonal al pavimento flexible, a una altura de 2,60 m, para alcanzar la mayor área posible y las fallas de pavimento que

lo contiene, y su obturación se realizó con la configuración en modo temporizador obteniendo imágenes cada segundo. Además se utilizó un nivel de mano y regla de aluminio para poner el sistema de captura de imágenes en la posición horizontal y ortogonal al pavimento flexible.

Las imágenes fueron capturadas dentro de cada carril en la red vial nacional PE-40 tramo: PE-40 km14+145 – km20+629 de pavimento flexible, de manera que el sistema de captura de imágenes se iba trasladando a las unidades de muestra a evaluarse previamente detectada con fallas establecidas según el PCI.

Se capturaron un total de 1500 imágenes en formato JPEG, en todo el recorrido de la vía con diferentes tipos de grietas, parcheo y demás fallas, en gabinete se filtra las imágenes que no corresponde al estudio según el número de muestras establecidas por el PCI. Cada imagen establece un área de superficie de pavimento de 4,50 m de largo por 3,00 m de ancho.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El método utilizado para la presente investigación es de tipo aplicada, debido a que el estudio se rige sobre los planteamientos y bases teóricas de pavimentos, según sus procedimientos y métodos de evaluación, para su aplicación en campo y esto permite conocer el estado actual de conservación de la vía y descriptiva porque tiene como finalidad detallar los hechos observados, en este caso la evaluación mediante el procesamiento de imágenes binarias obtenidas en la vía de estudio, para luego proponer una alternativa de solución que debe realizarse en la vía de estudio.

El tipo de investigación de la presente investigación es de enfoque mixto puesto que se tiene de dos tipos: cualitativo y cuantitativo. Se considera cualitativa ya que para el cálculo de Índice de Condición de Pavimento (PCI) se obtendrá resultados descriptivos como se indican la norma ASTM siendo así de: excelente, muy bueno, bueno, regular, pobre, muy pobre y fallado. Desde otro lado, es de tipo cuantitativa ya que el resultado que determine el PCI será de 7 escalas numéricas que inicia desde 0 y finaliza hasta 100.

### 3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación es no experimental, dado que no se alterará la variable independiente Índice de Condición de Pavimento (PCI). Además, es de diseño prospectivo, porque los datos obtenidos y recopilados serán los más recientes.

El diseño de la presente investigación es descriptivo - exploratorio dado que el estudio no modifica o altera las condiciones de evaluación del pavimento en el contexto de estudio, tomando como modelo en todo momento las condiciones de los pavimentos sin generar modificaciones sobre esta teoría.

De otra manera, según la época en que se realiza la investigación, es transversal, dado que su evaluación se realiza en un momento determinado del tiempo, en el cual se tomarán los datos en la red vial nacional PE-40 KM14+145 – KM20+629, Tacna - 2022.

### 3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA DE INVESTIGACIÓN

La carretera en estudio es clasificada e identificada en el (MTC, 2019) como red vial nacional y ruta N° PE-40 que comienza en Emp PE-IS (Tacna), y finaliza en Tripartito (frontera con Chile y Bolivia).

En este caso de estudio corresponde, según el siguiente itinerario del mapa vial del MTC: PE-40 KM14+145 - KM20+629 (MTC, 2019).

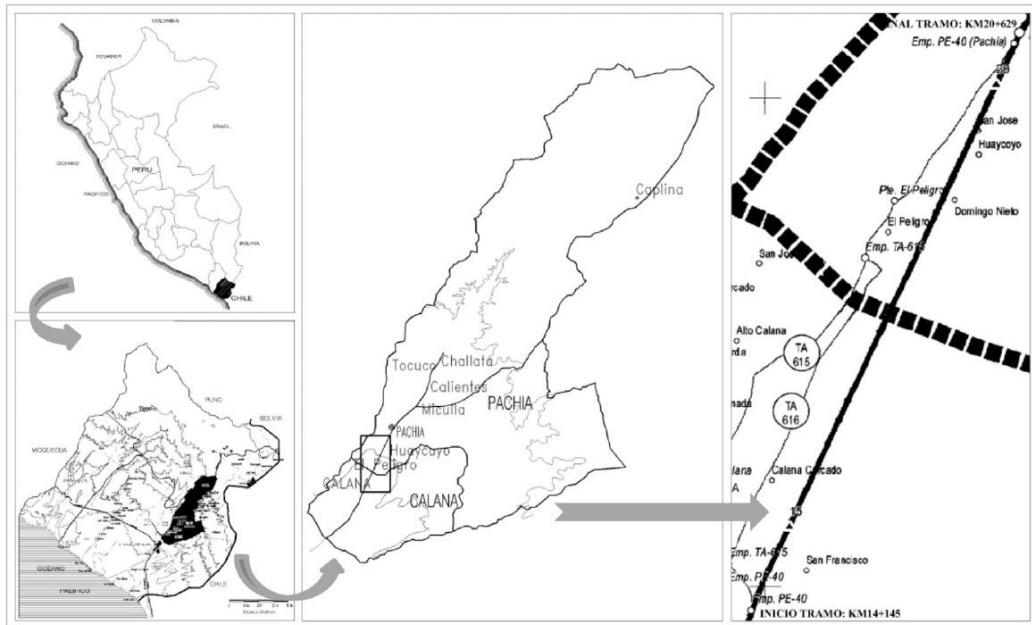


Figura 25. Tramo de red vial nacional PE-40 Kml4+145 - Km20+629  
Fuente: Propia

Determinamos la longitud de la unidad de muestreo según la tabla 2, donde corresponde para un ancho de vía de 6.00m una longitud de 38.3m, pero para efectos de facilidad de manejo de datos ya que se utiliza fotografías con un formato de 4m x 3m, las cuales son analizadas 20 fotografías como unidad de muestra, para la cual corresponde un área total de 240m<sup>2</sup>, se cumple con la norma de la ASTM D6433-16 la cual establece un área de 230.0 ± 93.0m<sup>2</sup>.

Luego determinamos el número total de unidades muestra utilizando la ecuación (2)

$$N = \frac{6,484.00}{40} = 162.10$$

Redondeando se obtiene un total de 163 unidades de muestra.

En el método PCI de la (ASTM, 2016), define que a cada tramo de muestra debe tener un área entre el rango de  $225 \pm 90$  m<sup>2</sup>. Por ello, se ha tomado unidades de muestra de 1630 m<sup>2</sup> cada una, las cuales nos dan un total de 15 unidades de muestra en tramos de 35.4m.

Determinamos las unidades de muestreo utilizando la ecuación (1), donde se obtiene un valor de 14.64 que redondeando obtenemos una cantidad mínima de unidades de muestro siendo de 15 unidades.

### 3.4 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

**Cámara digital:** Con una cámara de 20 MP, montada sobre un vehículo motorizado y ubicada a la altura adecuada para capturar todo el ancho de la vía, la toma de fotografías es realizada cada segundo y temporizadas por la cámara digital, las fotos obtenidas tienen un formato JPG con una resolución de 3264x2448píxeles.

**Vehículo motorizado:** Se utiliza un vehículo adaptado para colocación de la cámara digital como una posición ortogonal a la vía, la cual permite obtener fotografías mediante un temporizador, las fotografías están programadas a tomarse y vehículo tendrá que circular a una velocidad de 20Km/h.



***Regla o cordel:*** Instrumento necesario para visualizar y medir las ondulaciones y deformaciones longitudinales y transversales del pavimento flexible de estudio.

***Conos de seguridad vial:*** Se utiliza para delimitar el área de calle en estudio, puesto que el tráfico que presenta la vía representa un peligro para los evaluadores e inspectores que tienen que laborar tomando las mediciones sobre el pavimento.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1 DETERMINACION DE RESULTADOS DEL METODO PCI**

Usando los formatos dados por la ASTM D6433-16 de la evaluación de condición para carreteras con superficie asfáltica, se obtuvieron los parámetros de evaluación logrando así identificar el tipo, severidad y extensión del daño que existe en el pavimento flexible de las 15 unidades de muestreo, las cuales se muestran en cuadros resumen siguiendo el procedimiento para su determinación del PCI en cada unidad de muestra y así obtener un PCI promedio del total de muestras.

*Tabla 4*  
*Cantidad de daños según tipo y severidad*

ÍTEM	TIPO DE DAÑO	CODIGO	UNIDAD	NIVEL DE SEVERIDAD	CANTIDAD
1	Piel de Cocodrilo	PC	m2	H	0.00
				M	6.59
				L	0.00
2	Exudación	EX	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00
3	Agrietamiento en Bloque	AB	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	1.70
4	Abultamientos y Hundimientos	AH	m2	H	0.00
				M	8.10
				L	0.00
5	Corrugación	CO	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00
6	Depresión	DE	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00
7	Grieta de Borde	GB	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00
8	Grieta de Reflexión de Junta	GJ	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00
9	Desnivel Carril / Berma	DCB	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00
10	Grietas Longitudinales y Transversales	GLT	m2	H	54.45
				M	165.97
				L	0.00
11	Parcheo y acometidas de servicios	PA	m2	H	8.00
				M	23.98
				L	0.00
12	Pulimentos de Agregados	PUA	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00
13	Huecos o Baches	BA	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	1.00
14	Cruce de Vía Férrea	CVF	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00
15	Ahuellamiento	AH	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00
16	Desplazamiento	DES	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	3.40
17	Grietas Parabólicas o por deslizamiento	GP	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.60
18	Hincharamiento	HI	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00
19	Meteorización / Desprendimiento de Agregados	DA	m2	H	0.00
				M	0.00
				L	0.00

*Fuente: Propia*

Tabla 5  
Número Admisible Máximo de Deducidos

UNIDAD DE MUESTRA	ABSCISA INICIAL	ABSCISA FINAL	Máx. VDC	m
UM-01	14+345.00	14+385.00	33.1	7.14
UM-02	14+785.00	14+825.00	74.5	3.34
UM-03	15+225.00	15+265.00	50.5	5.55
UM-04	15+665.00	15+705.00	49.1	5.67
UM-05	16+105.00	16+145.00	104	0.63
UM-06	16+545.00	16+585.00	73.3	3.45
UM-07	16+985.00	17+025.00	56.5	4.99
UM-08	17+425.00	17+465.00	78.5	2.97
UM-09	17+865.00	17+905.00	31.4	7.30
UM-10	18+305.00	18+345.00	58.5	4.81
UM-11	18+745.00	18+785.00	37.5	6.74
UM-12	19+185.00	19+225.00	32.1	7.24
UM-13	19+625.00	19+665.00	33.2	7.13
UM-14	20+065.00	20+105.00	27	7.70
UM-15	20+505.00	20+545.00	53	5.32

Fuente: Propia

Tabla 6  
Índice de Condición del Pavimento

UNIDAD DE MUESTRA	ABSCISA INICIAL	ABSCISA FINAL	PCI	CONDICION
UM-01	14+345.00	14+385.00	73.9	MUY BUENO
UM-02	14+785.00	14+825.00	51.8	REGULAR
UM-03	15+225.00	15+265.00	62	BUENO
UM-04	15+665.00	15+705.00	62	BUENO
UM-05	16+105.00	16+145.00	39.9	MALO
UM-06	16+545.00	16+585.00	48	REGULAR
UM-07	16+985.00	17+025.00	57.5	BUENO
UM-08	17+425.00	17+465.00	42	REGULAR
UM-09	17+865.00	17+905.00	69	BUENO
UM-10	18+305.00	18+345.00	60.5	BUENO
UM-11	18+745.00	18+785.00	71	MUY BUENO
UM-12	19+185.00	19+225.00	68.5	BUENO
UM-13	19+625.00	19+665.00	68	BUENO
UM-14	20+065.00	20+105.00	71	MUY BUENO
UM-15	20+505.00	20+545.00	59	BUENO

Fuente: Propia

Tabla 7  
 Porcentaje por Rango de la Condición del Pavimento Flexible de la vía en estudio

CONDICIÓN	UNIDAD DE MUESTRA	ÁREA (m <sup>2</sup> )	PORCENTAJE (%)
Excelente	0	0	0.00
Muy Bueno	3	720	20.00
Bueno	8	1920	53.33
Regular	3	720	20.00
Malo	1	240	6.67
Muy Malo	0	0	0.00
Fallado	0	0	0.00
TOTAL	15	3600	100

Fuente: Propia

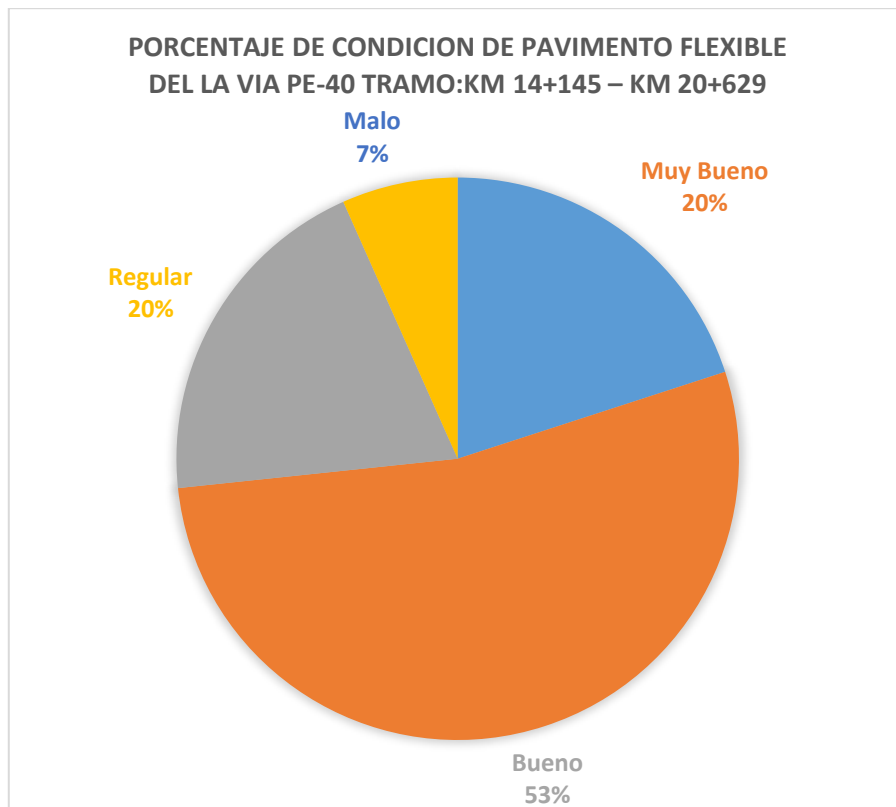


Figura 27. Gráfico Circular de Porcentajes por Rango de PCI de la vía en estudio  
 Fuente: Propia

## 4.2 RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES BINARIAS

4.2.1 Datos resumen obtenidas al ejecutar el código fuente de procesamiento de imágenes en el software Matlab.

*Tabla 8: Resultados de áreas y longitudes obtenidas mediante el procesamiento de imágenes binarias*

<b>UNIDAD DE MUESTRA</b>	<b>AREA TOTAL DE FISURAS (m2)</b>	<b>LONGITUD FISURA (m)</b>
UM-01	12.24	154.34
UM-02	17.28	123.86
UM-03	16.05	106.27
UM-04	17.25	122.22
UM-05	14.57	116.37
UM-06	13.97	126.21
UM-07	16.92	103.31
UM-08	15.51	96.71
UM-09	16.06	123.21
UM-10	13.87	112.86
UM-11	15.82	114.09
UM-12	16.59	103.63
UM-13	14.66	90.02
UM-14	16.08	104.17
UM-15	17.52	92.43

*Fuente: Propia*

#### 4.2.2 Análisis gráfico de fisuras en el pavimento mediante el procesamiento de imágenes binarias en el software Matlab.

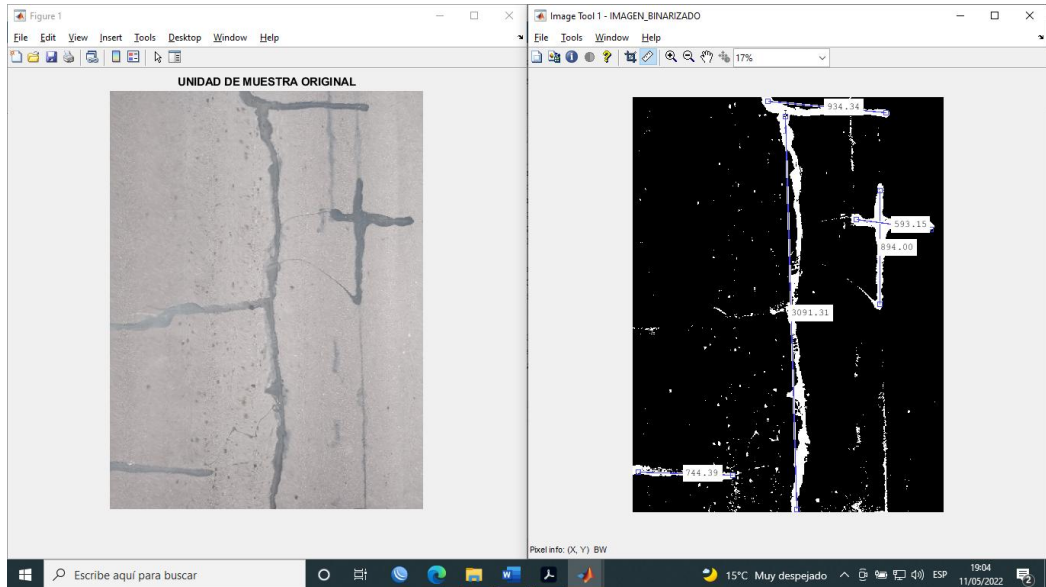


Figura 28: detección de fisuras mediante el uso de software Matlab  
Fuente: Propia

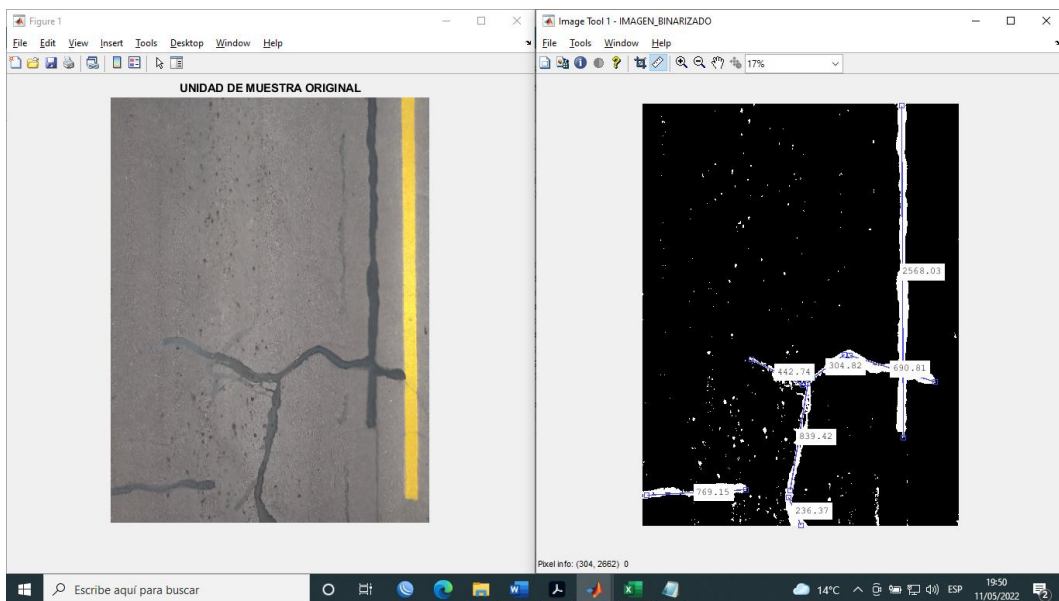


Figura 29: Imagen que muestra el suavizado de objetos de no son de análisis en el pavimento flexible  
Fuente: Propia

4.2.3 Código Fuente utilizado en el software Maltab, donde se invoca a las funciones que se trata las imágenes binarias.

```

1  %ALGORITMO QUE CONVIERTE UNA IMAGEN RBG A IMAGEN BINARIZADA
2  %Y CALCULA EL AREA DE FISURAS Y GRIETAS DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE
3  -
4  - clear all;
5  - %lectura de la imagen
6  - lect_img=imread('UM-01 (15).jpg');
7  - %conversion de imagen rgb a escala de grises
8  - esc_gris=rgb2gray(lect_img);
9  - %calculando el umbral de la imagen en escala de grises
10 - umbral=graythresh(esc_gris)
11 - %aplicando el filtro medianda
12 - esc_gris=medfilt2(esc_gris);
13 - %binarizacion de la imagen en escala de grises (umbral a eleccion)
14 - %al 0 mas negro // al 1 mas blanco
15 - binarizado = im2bw(esc_gris,0.55);
16 - %negando la imagen con la cual los negativos tienen el valor de 1
17 - IMAGEN_BINARIZADO = not(binarizado);
18 - %muestra la imagen binarizada en la herramienta imtool de matlab
19 - imtool(IMAGEN_BINARIZADO), title('UNIDAD DE MUESTRA BINARIZADA');
20 - %muestra la imagen original
21 - imshow(lect_img), title('UNIDAD DE MUESTRA ORIGINAL');
22 - %plot(lect_img)
23 - %CALCULO DE AREA DE FISURAS Y PARCHEOS
24 - %sumatoria total de pixeles positivos
25 - S=sum(IMAGEN_BINARIZADO,'all');
26 - %total de pixeles en la imagen
27 - Stotal=3264*2448;
28 - %area en metros cuadrados de pixeles positivos
29 - areafisuram2=S*12/Stotal

```

Figura 30. Código fuente de utilización de funciones de procesamientos de imágenes en el Software Matlab  
Fuente: Propia

#### 4.3 DISCUSION DE RESULTADOS DEL METODO DEL PCI

Luego de identificar los parámetros de la evaluación mediante el uso de fotografías y una inspección visual de las demás fallas en las 15 unidades de muestra de la vía

PE-40, se procedió a proceder a realizar el uso de la metodología del PCI, para obtener el índice de condición y así determinar el estado actual en el que se encuentra.

Se elaboró las tablas de resumen para presentar los resultados que se han obtenidos luego de la evaluación mediante la toma de fotografías y obteniéndose así el siguiente resultado:

Luego de realizar los cálculos y obtener los resultados en unidades de muestras de la vía PE-40 el cual comprende de 14 muestras, se determinó un PCI con un promedio de 63.07. Este resultado nos permite concluir y afirmar que en la Av LA RED VIAL NACIONAL PE-40 TRAMO: PE-40 KM14+145 – KM20+629 en condición BUENO.

#### 4.4 DISCUSION DEL USO DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES BINARIAS

Los resultados obtenidos en el procesamiento de imágenes binarios nos proporcionan información de áreas y longitud de fisuras encontradas en las 15 muestras analizadas, el software utilizado es Matlab con algoritmos de procesamiento de imágenes propias que son proporcionados en los anexos posteriores.

Las imágenes se obtuvieron mediante el uso de un cámara digital acondicionado a un vehículo, utilizando el temporizador de dicha cámara. Se puede determinar que estos datos han sido obtenidos de manera óptima sin riesgos a tener accidentes, como si en las demás fallas en los pavimentos que se ha tenido que obtener los datos cuando había un menor tráfico de vehículos.

# **CAPÍTULO V**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### 5.1 CONCLUSIONES

- En la presente investigación se evaluó la condición de pavimento flexible utilizando la metodología del PCI y el procesamiento de imágenes binarios en la red vial nacional PE-40 KM14+145 – KM20+629, Tacna - 2022.
- Se determinó el índice de condición del pavimento flexible, usando la metodología del Pavement Condition Index - PCI.
- Se Optimizó la recolección de datos de daños en pavimentos de manera semiautomática con el procesamiento de imágenes binarios.
- Se Analizó el estado de conservación del pavimento flexible de la en la red vial PE-40.

### 5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda a las entidades en especial a la Provias Descentralizado que ejecutan los proyectos para las vías nacionales, realizar una correcta ejecución de obras de asfaltado de vías y el mantenimiento, puesto que la vía es de mucha importancia, y que debe ser óptima y satisfactoria para los usuarios.

- Se debe considerar la presente investigación para que se evite de tránsito y ocasionar pérdidas humanas ya que esta vía es en línea recta y los vehículos circulan a gran velocidad; además de que ocasiona que el pavimento presente mayores fallas.
- A Provias Nacional descentralizado, realizar el mantenimiento respectivo de la vía para evitar el deterioro del pavimento y posterior reconstrucción que sería muy costoso, Se debe colocar señales en las zonas críticas para que los conductores no cometan hagan maniobras temerarias que deterioran del pavimento y causan accidentes.
- Se recomienda una obra adicional de bermas de estacionamiento, ya que son de gran importancia por ser una vía que transitan vehículos a gran velocidad, además de proteger al pavimento frente a la falla fisura de borde y permite el correcto estacionamiento de vehículos.
- Se recomienda optimizar el sistema de recopilación de datos semiautomatizado mediante el uso de sensores de profundidad y un vehículo con velocidad reducida y contralada para obtener información de todas las fallas consideradas por el PCI., ya que la presente investigación se pudo realizar en espacio bidimensional obteniéndose así las fallas de grietas y parcheo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, J. (2012). *Procesamiento y Analisis de Imagenes Digitales*. California: Creative Commons. Recuperado de <https://www.tee.ac.cr/libros/procesamiento-analisis-imagenes-digitales>
- American Society for Testing and Materials [ASTM] (2016). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index*, Washington, U.S.A., ASTM D6433-16 Recuperado de <http://www.cee.mtu.edu/~balkire/CE5403/ASTMD6433.pdf>
- Battiato, S., Stanco, F., Cafiso, S. & Di Graziano, A. (2007). *Adaptive Imaging Techniques for Pavement Surface Distress Analysis (VOL.2)*. Catania. <https://doi.org/10.1685/CSC06016>
- Berrio L. & Ussa A. (2012) *Auscultación de pavimentos mediante interpretación de imagenes* (Tesis, Universidad Militar Nueva Granada). Recuperada de <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/9359>
- Bull, A. (2003) *Un Nuevo Paradigma para la Conservación Vial: de Hacer lo que se Puede a Hacer lo que es Exigible*. Trabajo presentado en el Primer Congreso de Fondos de Conservación Vial de Centroamerica, Santiago, Chile. Recuperado de <http://www.zietlow.com/docs/Bull-paradigma.pdf>
- Cafiso, S., Di Graziano, A. & Battiato, S. (2006). *Evaluation Of Pavement Surface Distress Using Digital Image Collection And Analysis*. Istanbul. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/242116177\\_Evaluation\\_Of\\_Pavement\\_Surface\\_Distress\\_Using\\_Digital\\_Image\\_Collection\\_And\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/242116177_Evaluation_Of_Pavement_Surface_Distress_Using_Digital_Image_Collection_And_Analysis).
- Cline, G., Shahin, M. & Burkhalter, J. (2003). *Automated data collection for pavement condition index survey*. EE.UU. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/229057393\\_Automated\\_data\\_col](https://www.researchgate.net/publication/229057393_Automated_data_col)

lection\_for\_pavement\_condition\_index\_survey.

Cruz J. & Gutierrez J. (diciembre, 2018). *Evaluación Superficial de Vías Urbanas empleando Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT)*. *Metodos & Materiales*, vol. 8, 23-32. <https://doi.org/10.15517/MYM.V8I11.34113>

Flamarz, S. (2017). *Flexible Pavement Evaluation: A Case Study*. *Kurdistan*. <https://doi.org/10.24017/science.2017.3.33>

Herra L. (febrero, 2018). *Conceptualización del procesamiento digital de imágenes para la evaluación de superficies de pavimento en Costa Rica*. *Infraestructura Vial / LanammeUCR*, 20(35), 20-26. <https://doi.org/10.15517/IV.V20I35.34831>

Hu, Y., Zhao, Ch. & Wang, H. (2010). *Automatic Pavement Crack Detection Using Texture and Shape Descriptors*. *Nanjing*. <https://doi.org/10.4103/0256-4602.62225>

Macea, L., Morales, L. & Marquez L. Gunio, 2016) *Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo*. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 17(2), 223-235. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.007>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC] (2016). *Manual de Carreteras Mantenimiento o Conservación Vial*. Cap 3 Pag: 36-39, Cap 4 Pag: 86-109. Lima. Recuperado de: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/manuales.html](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html).

Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC] (2014). *Manual de Inventarios Viales Parte IV*. Lima. Pag: 278-295,. Recuperado de [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/manuales.html](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html)

Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC] (2019). *Clasificador de rutas del Sistema Nacional de Carreteras - SINAC*. Recuperado de

<https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/rutas.html>

Oliveira, H. & Correia, P. (2009). *Automatic road crack segmentation using entropy and image dynamic thresholding*. Glasgow. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/242116177\\_Evaluation\\_Of\\_Pavement\\_Surface\\_Distress\\_Using\\_Digital\\_Image\\_Collection\\_And\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/242116177_Evaluation_Of_Pavement_Surface_Distress_Using_Digital_Image_Collection_And_Analysis).

Porras, H., Ramon, J., Mejia, Y., & Parra, J. Gunio, (2014). *Sistemas Automaticos para la Adquisición de Datos Enfocados a Examinar Pavimentos Flexibles*. *Ciencia e Ingenieria Neogranadina*, 24(1), 79-98. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=911191131484005>

Porras, H., Castaneda E., Sanabria D., & Medina G. (octubre, 2012). *Detección automática de grietas de pavimento asfáltico aplicando características geométricas y descriptores de forma*. *INGE CUC*, 8(1), 261-280. Recuperado de: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/265>

Rodriguez Velasquez, E. D. (05 de Octubre de 2009). *docplayer*. Obtenido de docplayer: <https://docplayer.es/41089082-Calculo-del-indice-de-condiciondel-pavimento-flexible-en-la-av-luis-montero-districto-de-castilla.html>

Tseng, Y., Kang, S., Su, Y., Lee, C. & Chang, J. (2010). *Strategies for autonomous robot to inspect pavement distresses*. Taipei. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5650543>.

Vásquez, L. (2002). *Pavement Condition Index (PCI)*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

Wright, P. & Dixon K. (2004). *Highway Engineering*. (7° edición). New York: John Wiley. ISBN 13: 9788126524518

## ANEXOS

### A. PANEL FOTOGRAFICO DE LA EVALUACION MEDIANTE FOTOGRAFIAS DE LAS FALLAS SUPERFICIALES EN LA RED VIAL NACIONAL PE-40 TRAMO: PE-40 KM14+145 – KM20+629



*Fotografía de vehículo utilizado para la colocación de la cámara digital en una altura adecuada para la obtención de fotografías*



*Evaluador de la via PE-40 con implementos de seguridad.*



*Fotografía de inicio de la evaluación de la vía de PE-40*



*Fotografía de fin de evaluación de la vía de PE-40*



*Fotografía de fallas tipo parcheo encontradas de la vía de PE-40*



*Fotografía de tipo de grieta parabólica de la vía de PE-40*



*Fotografía falla tipo piel de cocodrilo de la vía de PE-40*

























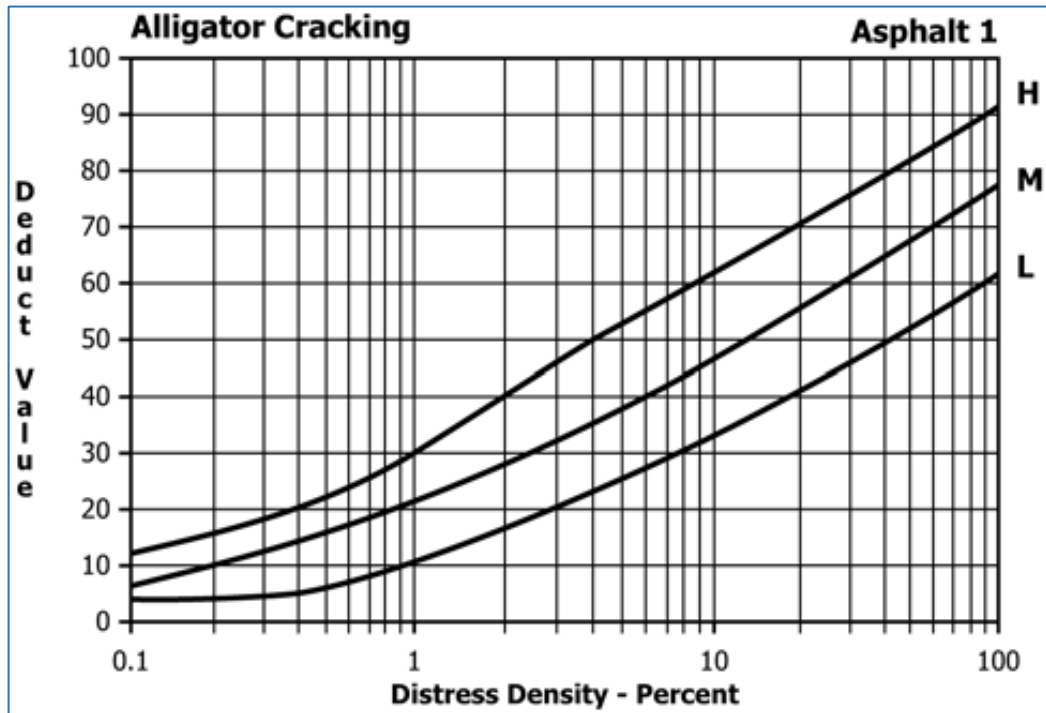




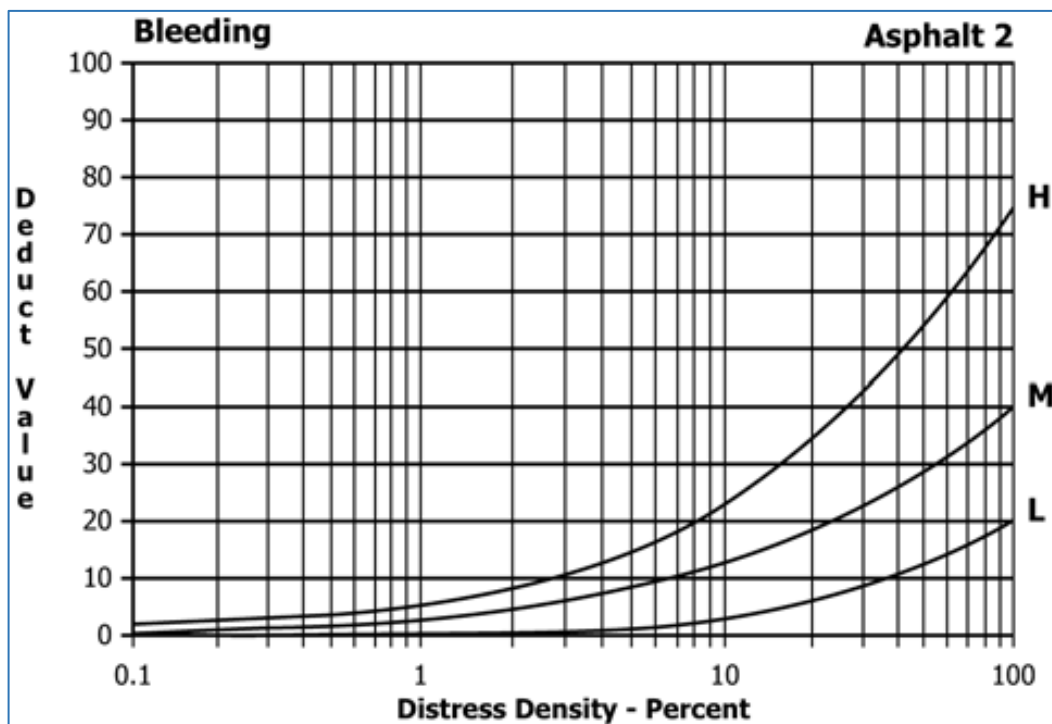


C. CURVAS DEL VALOR DEDUCIDO DE LAS FALLAS SUPERFICIALES,  
SEGÚN EL PCI

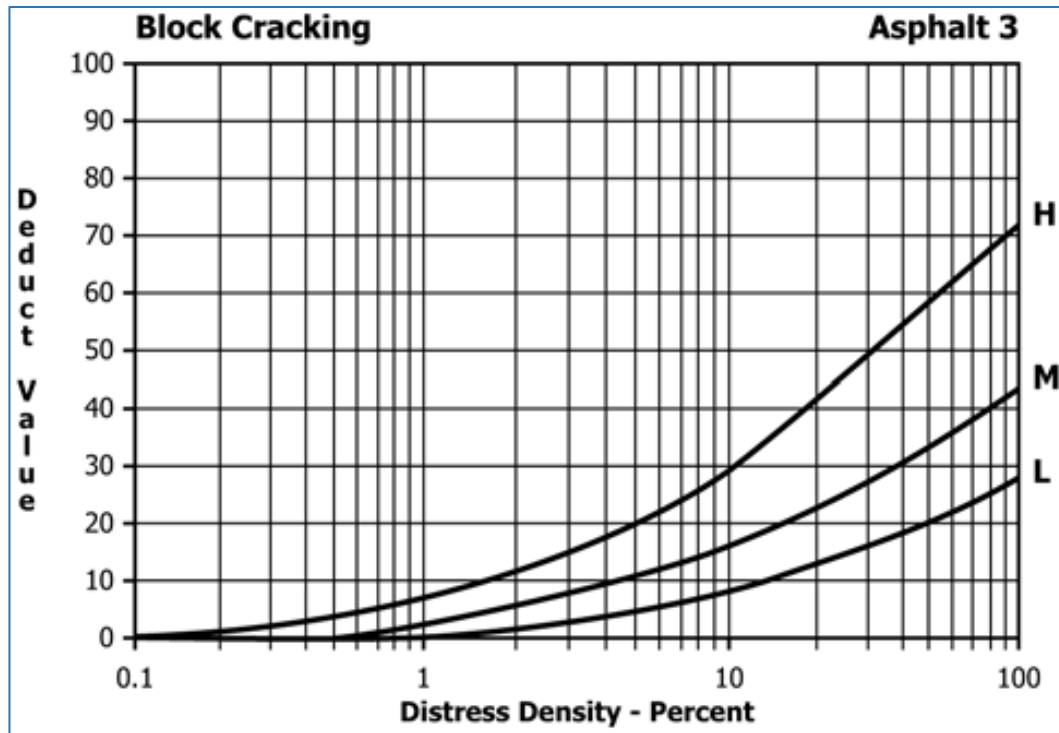
1. Piel de cocodrilo



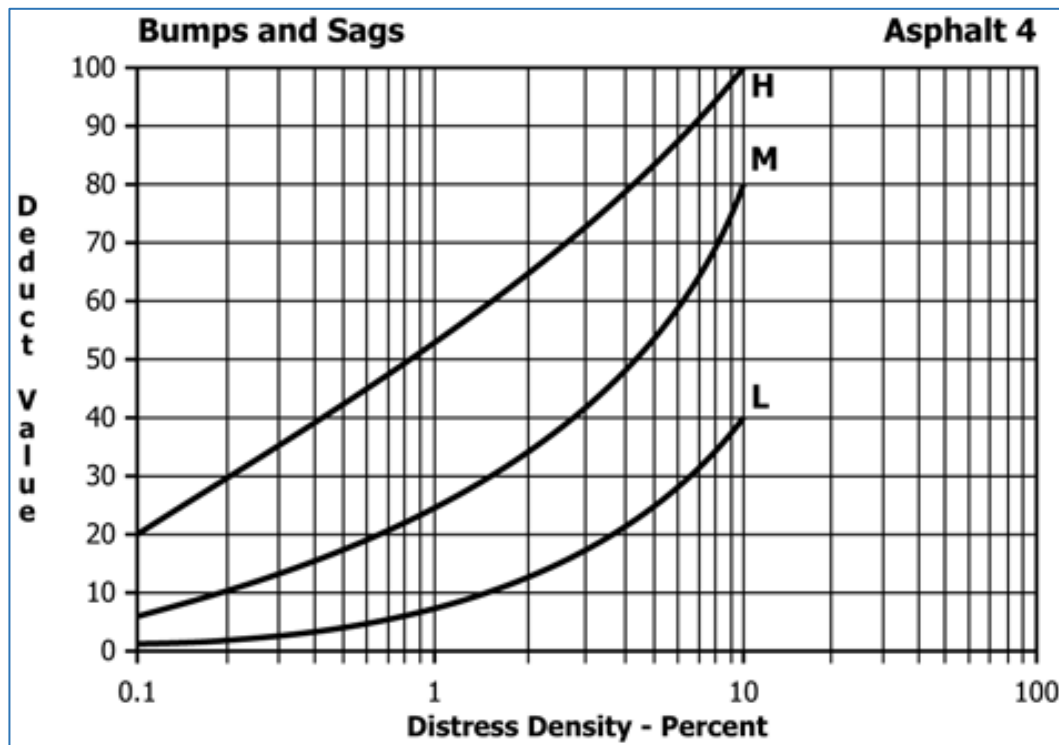
2. Exudación



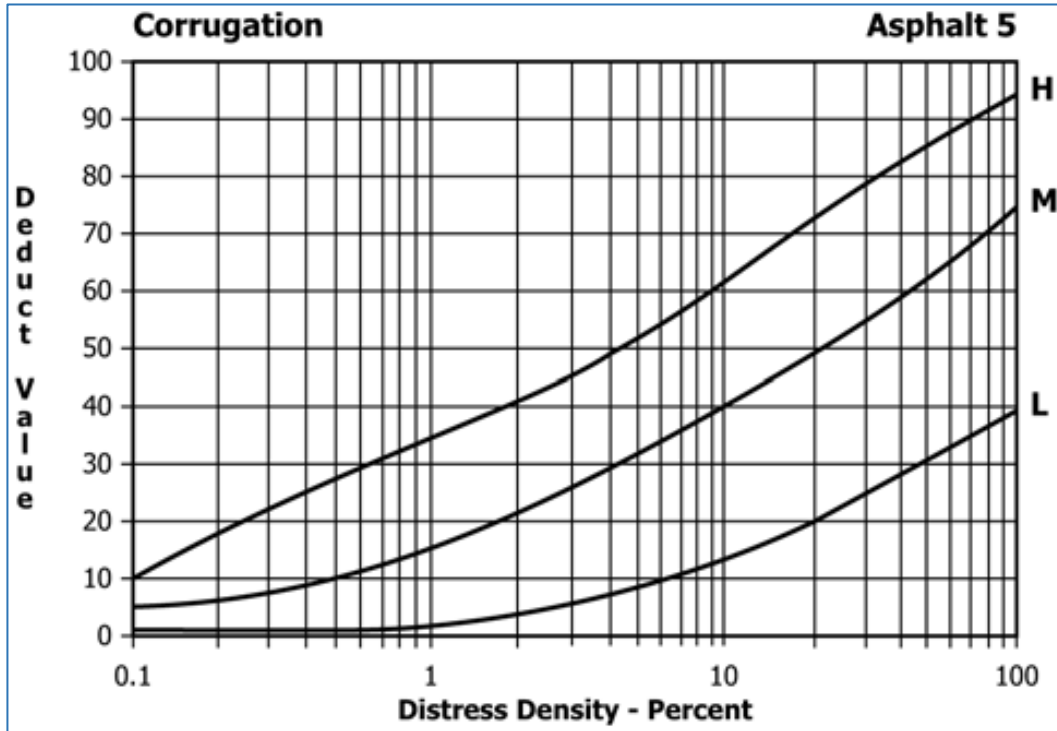
3. Agrietamiento en bloque



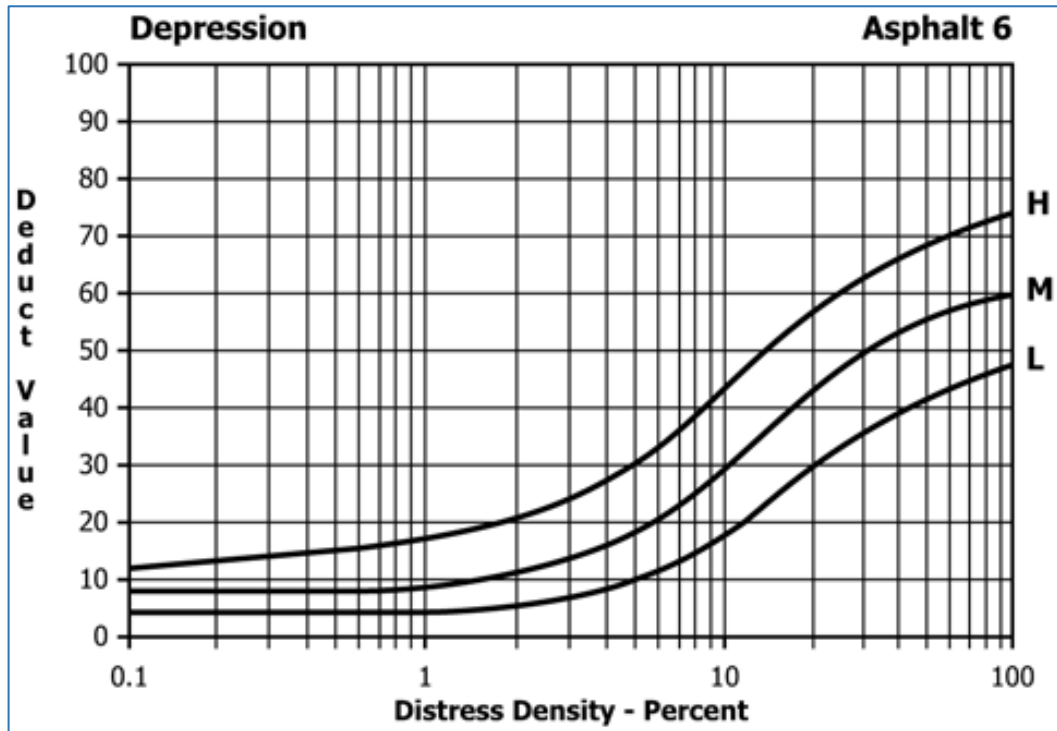
4. Abultamientos y hundimientos



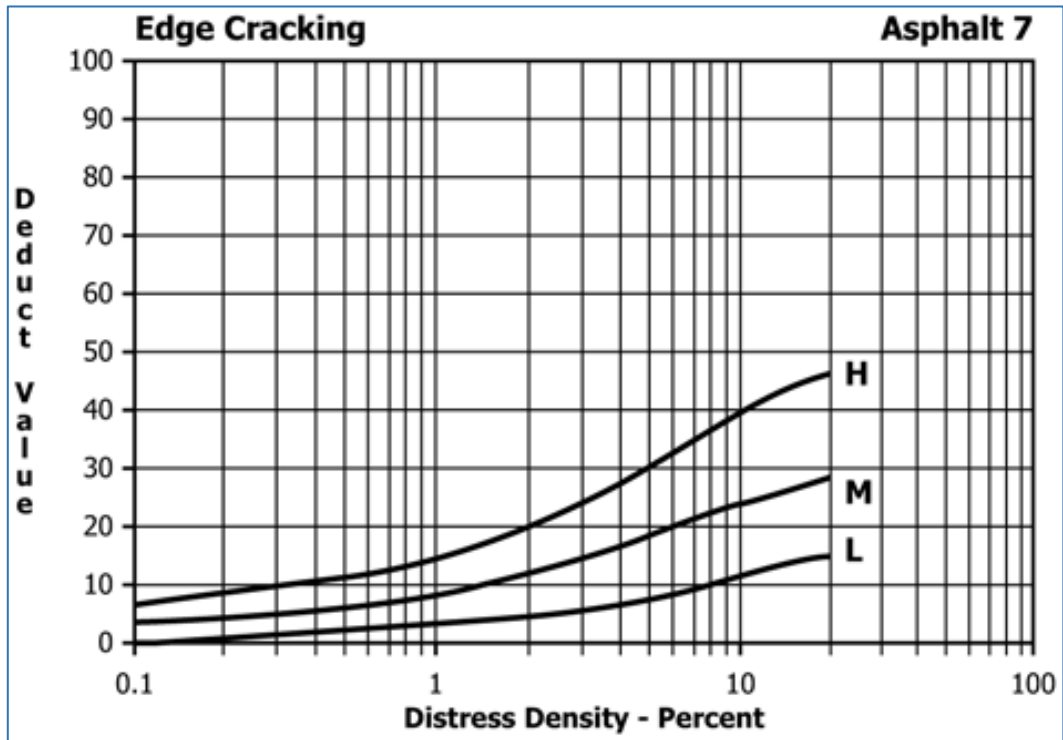
5. Corrugación



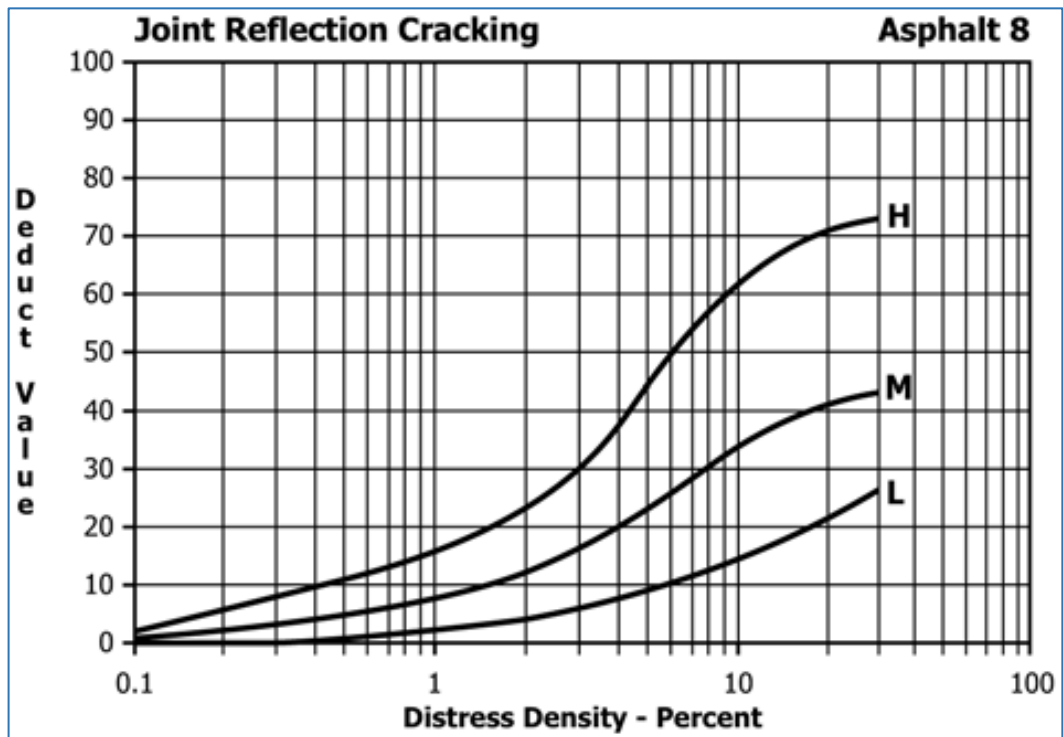
6. Depresión



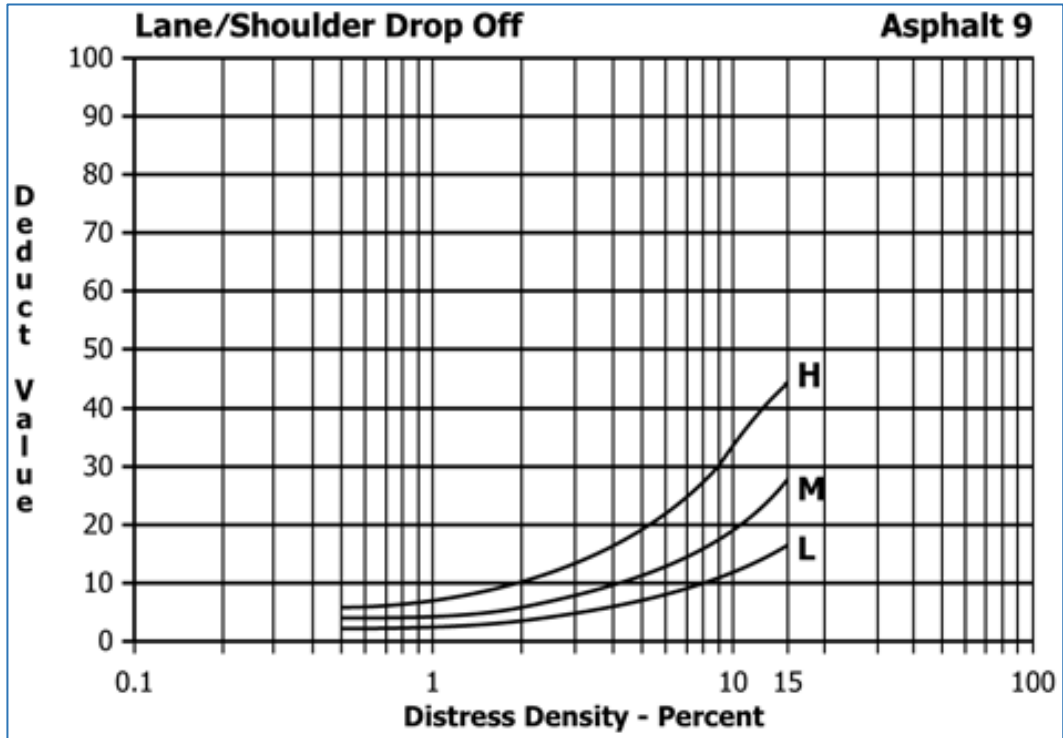
7. Grieta de borde



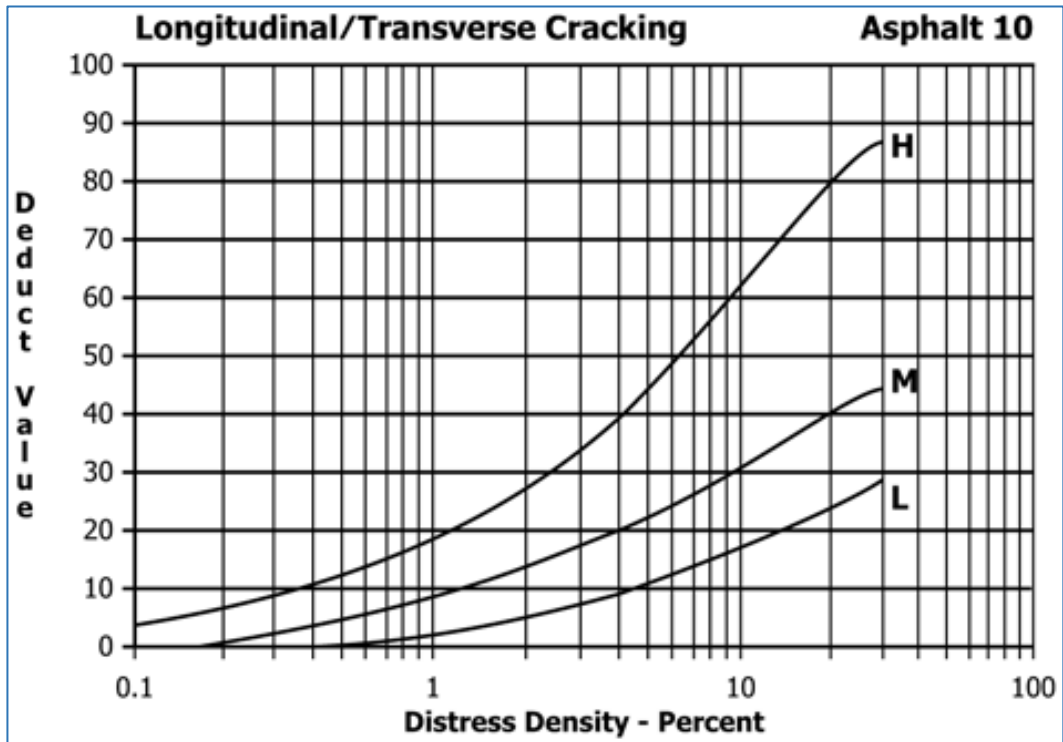
8. Grieta de reflexión de junta



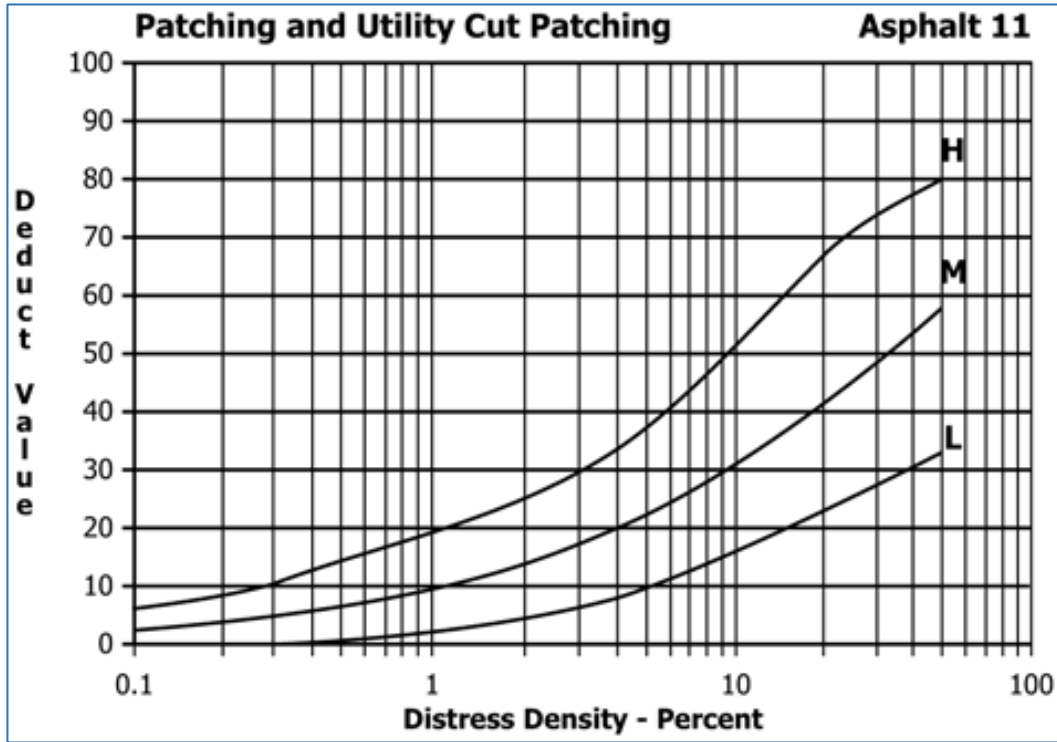
9. Desnivel carril / berma



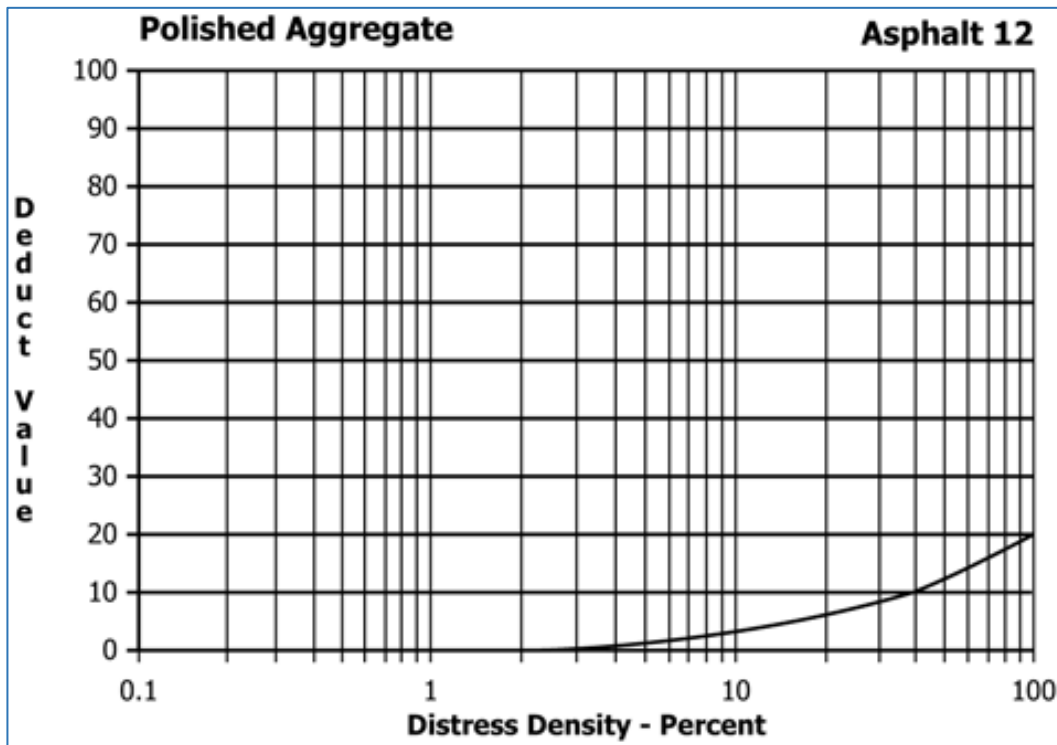
10. Grietas longitudinales y transversales



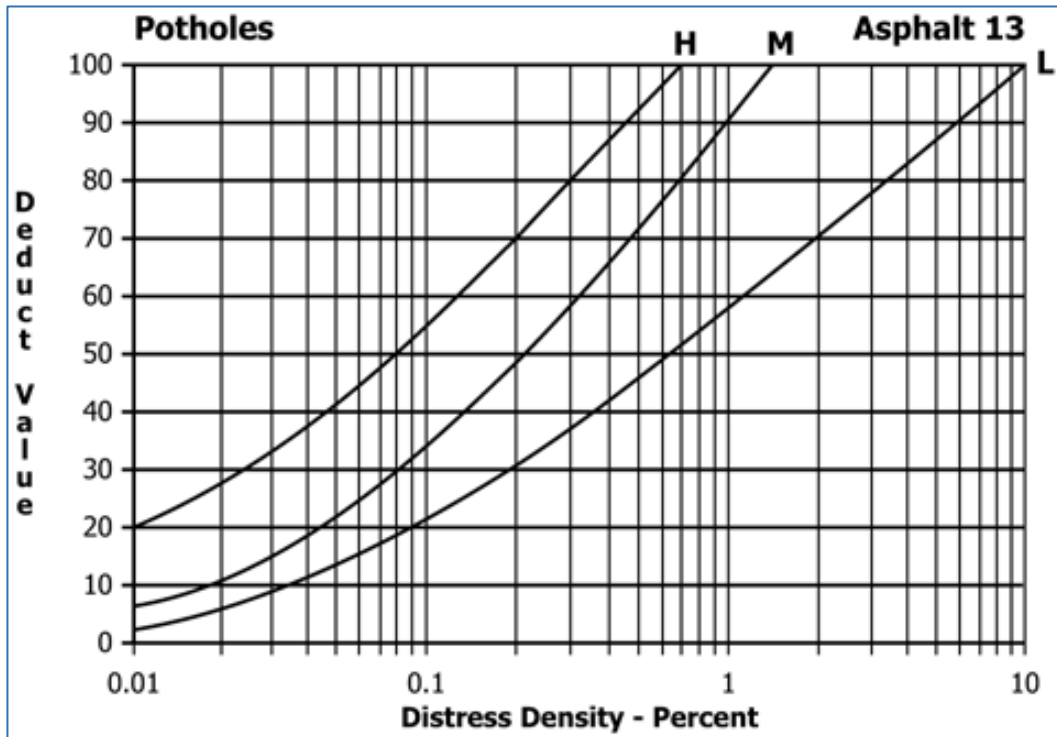
11. Parcheo



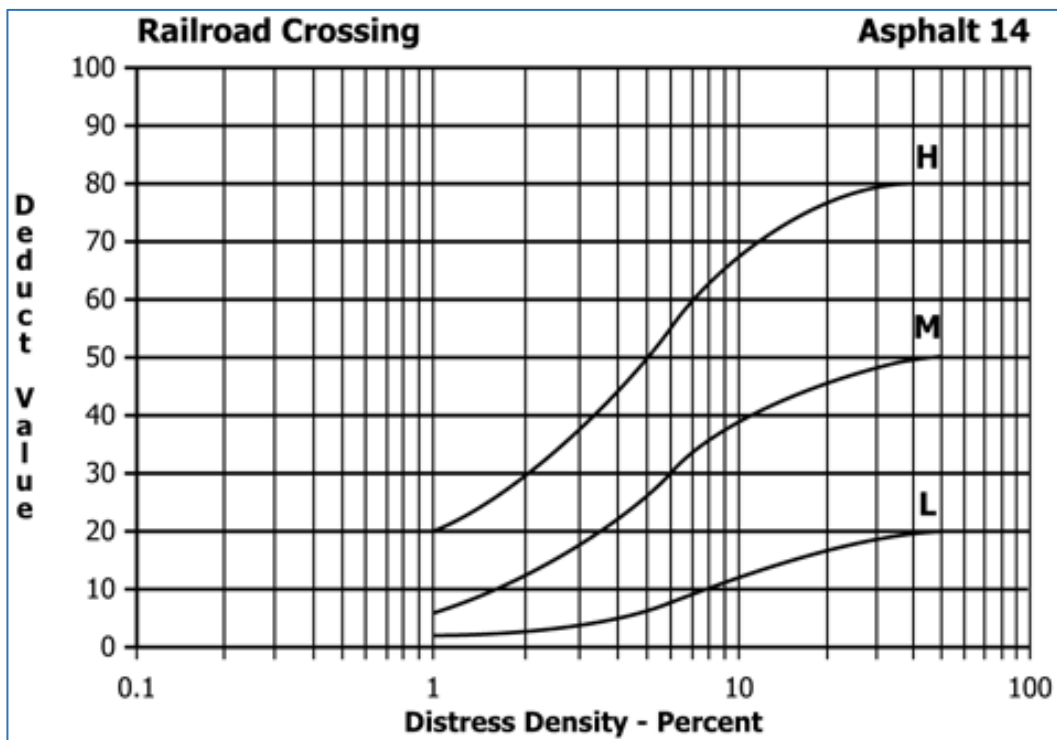
12. Pulimiento de agregados



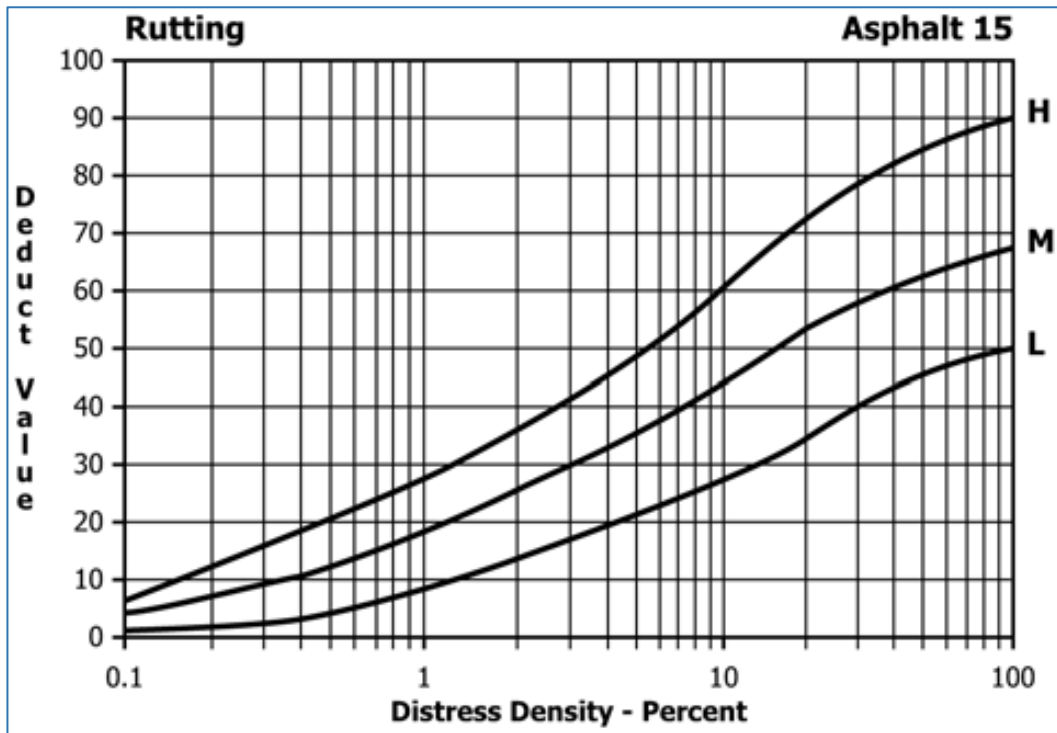
13. Huecos



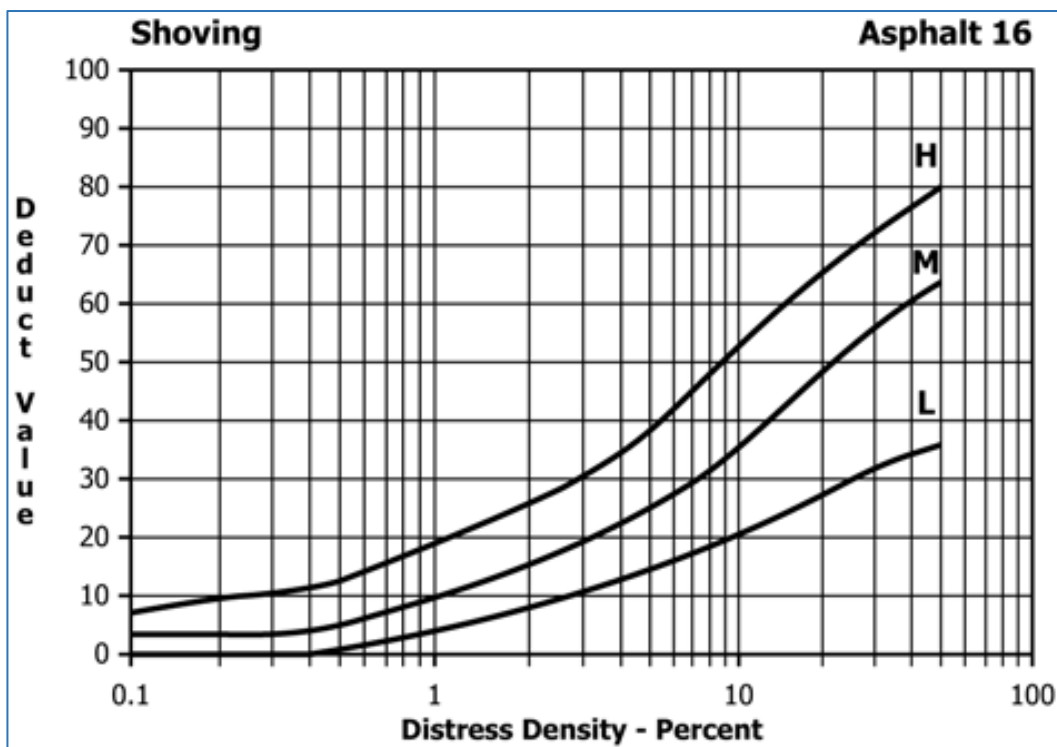
14. Cruce de vía férrea



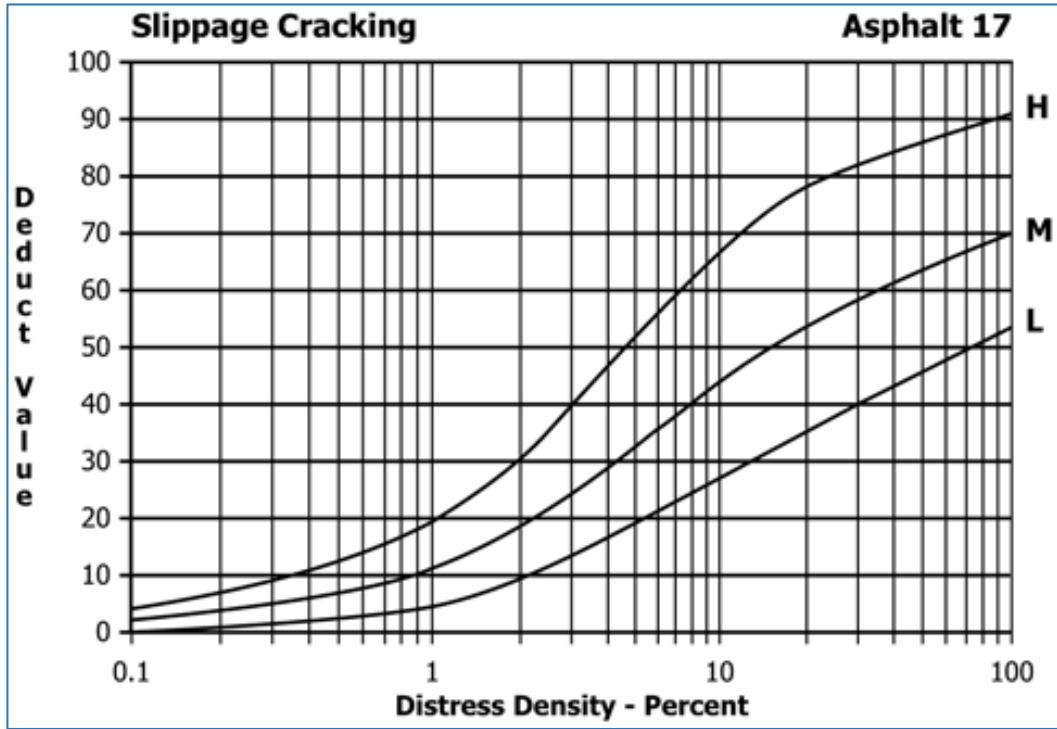
15. Ahuellamiento



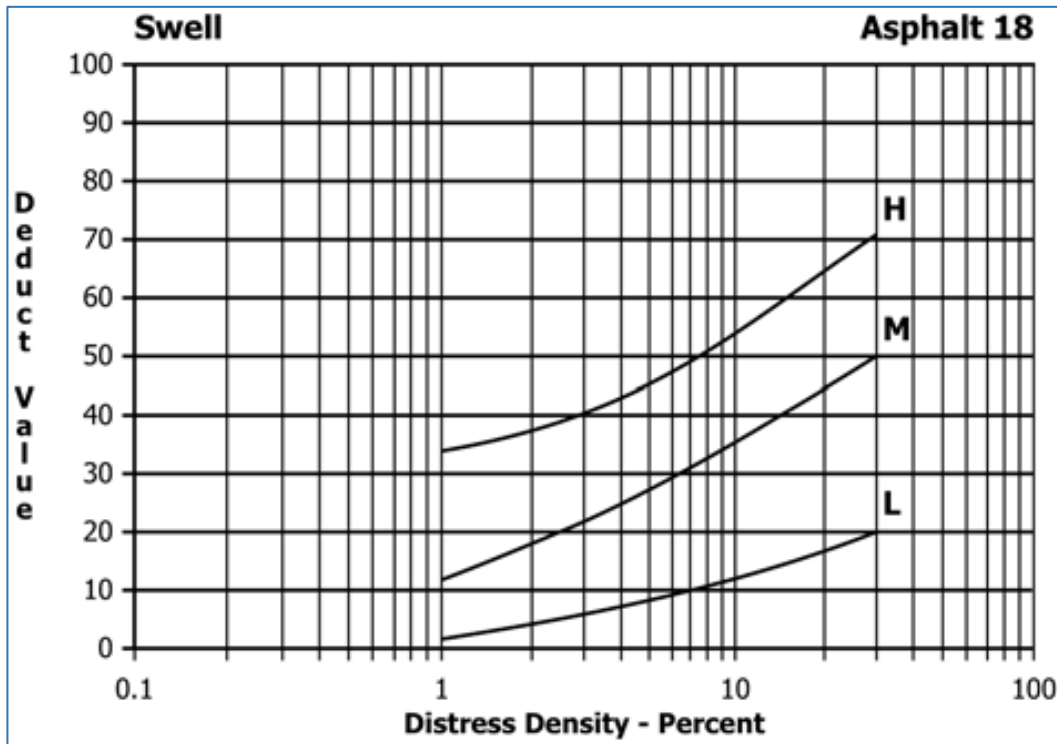
16. Desplazamiento



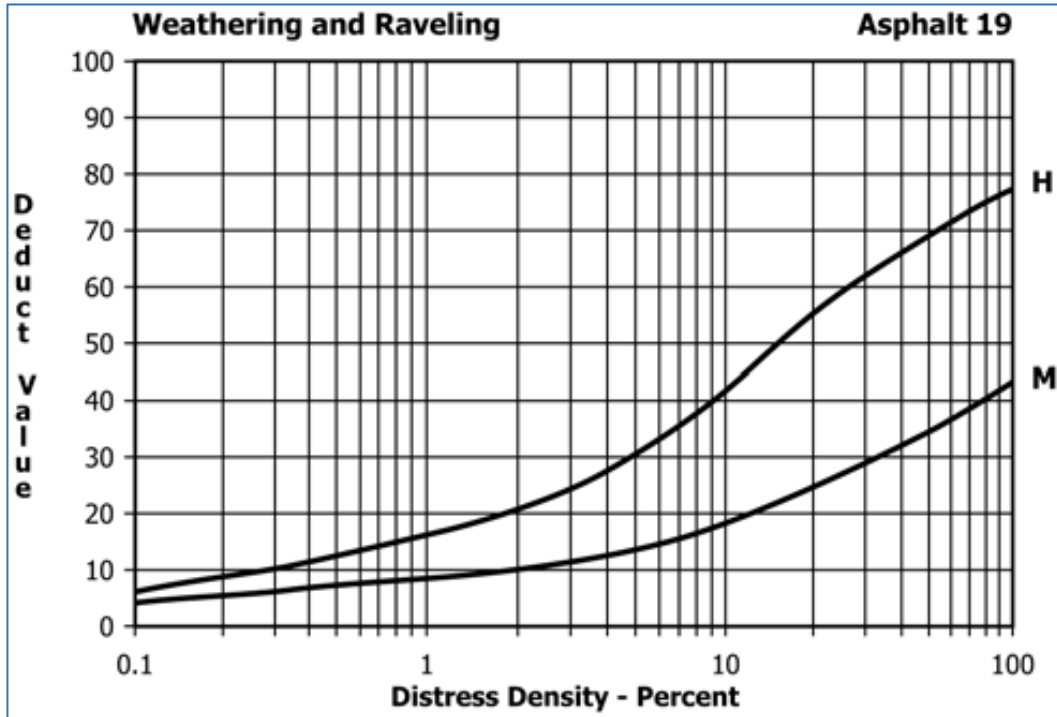
17. Grieta parabólica



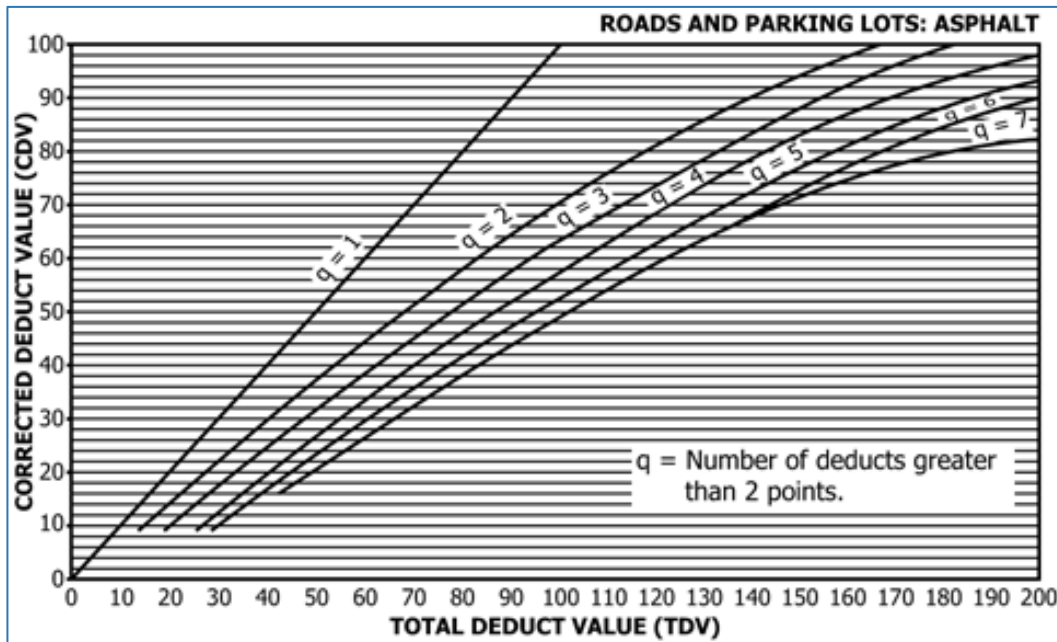
18. Hinchamiento



19. Desprendimiento de agregados



20. Curvas para hallar el valor deducido corregido (VDC)



D. CODIGO DE FUENTE UTILIZADO PARA LA OBTENCION DE DATOS,  
UTILIZANDO LAS FUNCIONES PROPIAS DEL MATLAB PARA EL  
PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.

```
%ALGORITMO QUE CONVIERTE UNA IMAGEN RBG A IMAGEN  
BINARIZADA  
%Y CALCULA EL AREA DE FISURAS Y GRIETAS DE UN PAVIMENTO  
FLEXIBLE  
clc;  
clear all;  
%lectura de la imagen  
lect_img=imread('UM-01 (15).jpg');  
%conversion de imagen rbg a escala de grises  
esc_gris=rgb2gray(lect_img);  
%calculando el umbral de la imagen en escala de grises  
umbral=graythresh(esc_gris)  
%aplicando el filtro medianda  
esc_gris=medfilt2(esc_gris);  
%binarizacion de la imagen en escala de grises (umbral a  
eleccion)  
%al 0 mas negro // al 1 mas blanco  
binarizado = im2bw(esc_gris,0.55);  
%negando la imagen con la cual los negativos tienen el  
valor de 1  
IMAGEN_BINARIZADO = not(binarizado);  
%muestra la imagen binarizada en la herramienta imshow de  
Matlab donde se obtiene las longitudes de las fisuras  
imshow(IMAGEN_BINARIZADO), title('UNIDAD DE MUESTRA  
BINARIZADA');  
%muestra la imagen original  
imshow(lect_img), title('UNIDAD DE MUESTRA ORIGINAL');  
%plot(lect_img)  
%CALCULO DE AREA DE FISURAS Y PARCHEOS  
%sumatoria total de pixeles positivos  
S=sum(IMAGEN_BINARIZADO,'all');  
%total de pixeles en la imagen  
Stotal=3264*2448;  
%area en metros cuadrados de pixeles positivos  
areafisuram2=S*12/Stotal
```

E. CUADROS DE DATOS OBTENIDOS POR CADA UNIDAD DE FOTOGRAFIA  
EN LA 15 UNIDADES DE MUESTRA.

UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)	UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)
UM-01 (1)	0.60	0.66	7.67	UM-02 (1)	0.48	0.85	5.02
UM-01 (2)	0.40	0.56	7.17	UM-02 (2)	0.46	0.77	7.26
UM-01 (3)	0.55	0.56	7.78	UM-02 (3)	0.52	0.39	7.61
UM-01 (4)	0.47	0.81	9.38	UM-02 (4)	0.42	1.15	9.94
UM-01 (5)	0.50	0.56	8.70	UM-02 (5)	0.4	0.46	9.77
UM-01 (6)	0.57	1.06	12.28	UM-02 (6)	0.51	1.07	5.89
UM-01 (7)	0.40	0.55	6.76	UM-02 (7)	0.53	0.37	1.03
UM-01 (8)	0.57	0.51	8.53	UM-02 (8)	0.51	0.99	6.37
UM-01 (9)	0.40	0.51	6.12	UM-02 (9)	0.47	0.90	2.93
UM-01 (10)	0.40	0.53	6.82	UM-02 (10)	0.58	0.96	2.39
UM-01 (11)	0.44	0.44	5.68	UM-02 (12)	0.43	1.29	9.73
UM-01 (12)	0.44	0.21	2.37	UM-02 (12)	0.44	0.46	5.89
UM-01 (13)	0.40	-	3.33	UM-02 (13)	0.44	0.92	4.46
UM-01 (14)	0.43	0.66	8.44	UM-02 (14)	0.48	1.22	4.32
UM-01 (15)	0.43	1.02	9.46	UM-02 (15)	0.41	0.61	9.56
UM-01 (16)	0.00	-	-	UM-02 (16)	0.43	0.36	9.83
UM-01 (17)	0.57	0.63	6.90	UM-02 (17)	0.54	1.21	1.17
UM-01 (18)	0.57	0.66	7.63	UM-02 (18)	0.41	1.15	3.20
UM-01 (19)	0.57	1.24	15.42	UM-02 (19)	0.48	1.00	7.13
UM-01 (20)	0.55	1.09	13.92	UM-02 (20)	0.49	1.15	10.38
TOTAL		12.24	154.34	TOTAL		17.28	123.86

UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)	UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)
UM-03 (1)	0.44	1.18	8.08	UM-04 (1)	0.46	1.04	8.53
UM-03 (2)	0.43	0.39	2.95	UM-04 (2)	0.54	1.25	8.84
UM-03 (3)	0.59	0.57	5.04	UM-04 (3)	0.57	0.74	2.47
UM-03 (4)	0.40	0.40	2.75	UM-04 (4)	0.45	0.89	6.79
UM-03 (5)	0.43	0.64	6.50	UM-04 (5)	0.58	0.82	3.33
UM-03 (6)	0.42	1.00	9.14	UM-04 (6)	0.48	0.69	4.16
UM-03 (7)	0.49	0.32	4.09	UM-04 (7)	0.5	0.40	9.00
UM-03 (8)	0.51	0.54	3.82	UM-04 (8)	0.46	1.08	3.30
UM-03 (9)	0.54	1.04	8.33	UM-04 (9)	0.54	0.95	9.09
UM-03 (10)	0.50	0.34	4.32	UM-04 (10)	0.51	1.13	1.13
UM-03 (12)	0.52	0.99	3.61	UM-04 (12)	0.52	1.20	4.28
UM-03 (12)	0.56	1.21	1.85	UM-04 (12)	0.57	0.51	2.50
UM-03 (13)	0.44	0.86	9.04	UM-04 (13)	0.46	1.29	9.35
UM-03 (14)	0.48	0.84	8.35	UM-04 (14)	0.56	1.09	4.36
UM-03 (15)	0.46	1.00	2.97	UM-04 (15)	0.46	1.00	9.44
UM-03 (16)	0.60	1.02	5.03	UM-04 (16)	0.41	0.31	2.43
UM-03 (17)	0.50	0.52	9.14	UM-04 (17)	0.43	0.49	8.38
UM-03 (18)	0.58	0.98	3.38	UM-04 (18)	0.57	1.16	8.36
UM-03 (19)	0.58	1.29	3.97	UM-04 (19)	0.58	0.57	8.36
UM-03 (20)	0.48	0.92	3.90	UM-04 (20)	0.5	0.64	8.11
TOTAL		16.05	106.27	TOTAL		17.25	122.22

UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)	UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)
UM-05 (1)	0.49	0.74	10.19	UM-06 (1)	0.59	0.41	5.69
UM-05 (2)	0.49	0.43	4.72	UM-06 (2)	0.57	0.54	2.84
UM-05 (3)	0.58	0.25	8.01	UM-06 (3)	0.51	1.27	2.99
UM-05 (4)	0.6	1.12	3.39	UM-06 (4)	0.44	0.74	3.68
UM-05 (5)	0.57	1.09	4.87	UM-06 (5)	0.55	0.97	4.43
UM-05 (6)	0.54	0.54	9.11	UM-06 (6)	0.51	0.51	9.62
UM-05 (7)	0.45	1.10	10.37	UM-06 (7)	0.53	0.54	8.06
UM-05 (8)	0.43	1.16	1.03	UM-06 (8)	0.54	0.82	2.72
UM-05 (9)	0.52	0.59	7.34	UM-06 (9)	0.57	1.09	7.14
UM-05 (10)	0.56	0.59	6.72	UM-06 (10)	0.41	0.94	4.39
UM-05 (12)	0.5	0.41	5.12	UM-06 (12)	0.44	0.38	5.27
UM-05 (12)	0.55	0.76	6.99	UM-06 (12)	0.53	0.52	8.13
UM-05 (13)	0.48	0.25	3.59	UM-06 (13)	0.58	1.19	9.31
UM-05 (14)	0.48	0.55	3.29	UM-06 (14)	0.4	0.29	7.86
UM-05 (15)	0.43	0.70	6.50	UM-06 (15)	0.55	0.26	9.60
UM-05 (16)	0.41	1.06	6.65	UM-06 (16)	0.6	0.74	7.96
UM-05 (17)	0.52	0.96	7.08	UM-06 (17)	0.59	0.91	6.75
UM-05 (18)	0.47	0.70	4.09	UM-06 (18)	0.4	0.64	8.14
UM-05 (19)	0.42	1.17	5.47	UM-06 (19)	0.44	0.84	9.83
UM-05 (20)	0.53	0.40	1.85	UM-06 (20)	0.55	0.37	1.83
TOTAL		14.57	116.37	TOTAL		13.97	126.21

UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)	UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)
UM-07 (1)	0.5	1.13	1.58	UM-08 (1)	0.44	0.67	5.97
UM-07 (2)	0.5	0.97	10.56	UM-08 (2)	0.47	1.21	5.60
UM-07 (3)	0.55	0.44	1.85	UM-08 (3)	0.45	0.57	4.77
UM-07 (4)	0.57	0.32	2.59	UM-08 (4)	0.57	1.25	9.26
UM-07 (5)	0.6	0.97	3.32	UM-08 (5)	0.41	0.78	5.57
UM-07 (6)	0.47	1.05	3.65	UM-08 (6)	0.6	0.85	2.76
UM-07 (7)	0.56	1.14	2.15	UM-08 (7)	0.49	1.06	2.29
UM-07 (8)	0.52	0.82	7.19	UM-08 (8)	0.47	1.04	4.38
UM-07 (9)	0.42	0.70	3.34	UM-08 (9)	0.58	0.35	4.40
UM-07 (10)	0.45	0.69	9.55	UM-08 (10)	0.6	0.31	7.28
UM-07 (12)	0.54	0.55	8.63	UM-08 (12)	0.57	0.27	8.54
UM-07 (12)	0.42	1.15	2.57	UM-08 (12)	0.48	1.30	4.34
UM-07 (13)	0.45	0.78	3.78	UM-08 (13)	0.45	1.07	1.11
UM-07 (14)	0.55	0.94	7.73	UM-08 (14)	0.55	0.94	8.14
UM-07 (15)	0.53	0.74	4.83	UM-08 (15)	0.58	0.90	5.88
UM-07 (16)	0.51	0.63	1.49	UM-08 (16)	0.53	0.86	9.16
UM-07 (17)	0.57	0.78	8.68	UM-08 (17)	0.4	0.44	3.14
UM-07 (18)	0.54	1.22	5.78	UM-08 (18)	0.41	0.45	1.20
UM-07 (19)	0.51	0.75	4.98	UM-08 (19)	0.45	0.76	1.84
UM-07 (20)	0.58	1.15	9.04	UM-08 (20)	0.58	0.43	1.06
TOTAL		16.92	103.31	TOTAL		15.51	96.71

UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)	UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)
UM-01 (1)	0.59	0.67	9.32	UM-02 (1)	0.58	1.00	5.02
UM-01 (2)	0.45	0.85	9.61	UM-02 (2)	0.51	0.92	8.38
UM-01 (3)	0.46	0.85	2.65	UM-02 (3)	0.58	0.71	5.89
UM-01 (4)	0.59	0.75	3.02	UM-02 (4)	0.53	0.25	1.91
UM-01 (5)	0.41	1.16	10.02	UM-02 (5)	0.54	0.33	9.35
UM-01 (6)	0.4	0.94	7.22	UM-02 (6)	0.48	0.31	6.98
UM-01 (7)	0.56	0.26	6.21	UM-02 (7)	0.47	0.36	4.06
UM-01 (8)	0.51	0.41	3.17	UM-02 (8)	0.49	1.03	7.76
UM-01 (9)	0.49	1.30	2.24	UM-02 (9)	0.47	0.75	5.68
UM-01 (10)	0.59	0.51	7.69	UM-02 (10)	0.56	1.14	2.46
UM-01 (11)	0.6	0.98	6.63	UM-02 (12)	0.54	0.44	6.97
UM-01 (12)	0.56	0.51	1.16	UM-02 (12)	0.54	0.30	6.30
UM-01 (13)	0.54	0.87	7.71	UM-02 (13)	0.55	0.94	8.55
UM-01 (14)	0.48	0.96	10.32	UM-02 (14)	0.53	0.90	2.51
UM-01 (15)	0.56	0.95	8.42	UM-02 (15)	0.41	0.58	2.09
UM-01 (16)	0.44	1.07	5.40	UM-02 (16)	0.52	0.47	6.67
UM-01 (17)	0.6	0.84	1.39	UM-02 (17)	0.53	1.18	4.49
UM-01 (18)	0.5	0.56	4.80	UM-02 (18)	0.47	0.52	5.83
UM-01 (19)	0.4	1.03	8.95	UM-02 (19)	0.54	1.23	3.54
UM-01 (20)	0.54	0.59	7.26	UM-02 (20)	0.48	0.51	8.41
TOTAL		16.06	123.21	TOTAL		13.87	112.86

UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)	UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)
UM-03 (1)	0.55	0.82	7.87	UM-04 (1)	0.48	1.25	2.36
UM-03 (2)	0.6	1.14	4.05	UM-04 (2)	0.47	0.86	8.80
UM-03 (3)	0.42	0.34	9.57	UM-04 (3)	0.47	0.26	10.14
UM-03 (4)	0.44	0.41	2.49	UM-04 (4)	0.44	1.05	8.30
UM-03 (5)	0.42	0.65	1.86	UM-04 (5)	0.48	0.34	1.09
UM-03 (6)	0.46	0.33	2.10	UM-04 (6)	0.45	0.99	9.48
UM-03 (7)	0.49	1.01	6.44	UM-04 (7)	0.6	0.77	1.73
UM-03 (8)	0.57	0.32	10.05	UM-04 (8)	0.48	0.92	1.90
UM-03 (9)	0.45	0.28	7.27	UM-04 (9)	0.43	1.14	3.35
UM-03 (10)	0.45	0.77	2.98	UM-04 (10)	0.54	0.67	8.22
UM-03 (12)	0.54	0.71	1.85	UM-04 (12)	0.43	0.26	7.70
UM-03 (12)	0.46	1.25	6.63	UM-04 (12)	0.43	0.30	7.29
UM-03 (13)	0.5	1.21	2.13	UM-04 (13)	0.6	0.70	2.26
UM-03 (14)	0.52	1.22	8.38	UM-04 (14)	0.48	0.84	7.43
UM-03 (15)	0.4	0.99	10.45	UM-04 (15)	0.5	0.52	5.55
UM-03 (16)	0.47	0.80	3.38	UM-04 (16)	0.44	1.30	1.57
UM-03 (17)	0.51	1.13	9.42	UM-04 (17)	0.45	0.98	2.35
UM-03 (18)	0.6	0.83	5.27	UM-04 (18)	0.41	0.98	3.07
UM-03 (19)	0.6	0.34	6.96	UM-04 (19)	0.47	1.27	8.61
UM-03 (20)	0.57	1.27	4.98	UM-04 (20)	0.58	1.19	2.42
TOTAL		15.82	114.09	TOTAL		16.59	103.63

UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)	UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)
UM-05 (1)	0.49	0.42	4.01	UM-06 (1)	0.46	0.92	5.95
UM-05 (2)	0.52	0.99	1.30	UM-06 (2)	0.44	0.46	6.75
UM-05 (3)	0.4	0.41	8.42	UM-06 (3)	0.56	1.28	8.63
UM-05 (4)	0.6	0.38	4.67	UM-06 (4)	0.51	0.67	7.38
UM-05 (5)	0.47	0.77	5.87	UM-06 (5)	0.59	1.21	5.15
UM-05 (6)	0.42	0.80	1.79	UM-06 (6)	0.5	0.46	8.72
UM-05 (7)	0.48	0.93	4.79	UM-06 (7)	0.5	0.86	1.95
UM-05 (8)	0.57	0.57	7.77	UM-06 (8)	0.57	0.33	1.14
UM-05 (9)	0.41	0.35	2.27	UM-06 (9)	0.56	0.28	5.66
UM-05 (10)	0.58	0.54	1.14	UM-06 (10)	0.47	1.14	4.86
UM-05 (12)	0.47	1.16	7.49	UM-06 (12)	0.53	1.19	3.64
UM-05 (12)	0.4	1.06	1.72	UM-06 (12)	0.54	0.66	0.94
UM-05 (13)	0.56	0.96	2.69	UM-06 (13)	0.47	0.76	8.19
UM-05 (14)	0.53	0.62	8.09	UM-06 (14)	0.4	0.63	1.72
UM-05 (15)	0.44	0.69	3.62	UM-06 (15)	0.41	1.26	2.73
UM-05 (16)	0.47	1.21	1.98	UM-06 (16)	0.56	1.22	4.69
UM-05 (17)	0.56	0.33	3.62	UM-06 (17)	0.59	0.60	4.82
UM-05 (18)	0.46	0.92	9.23	UM-06 (18)	0.59	0.30	8.31
UM-05 (19)	0.53	1.14	1.20	UM-06 (19)	0.47	1.28	4.62
UM-05 (20)	0.57	0.41	8.36	UM-06 (20)	0.44	0.57	8.31
TOTAL				TOTAL			
		14.66	90.02			16.08	104.17

UNIDAD DE MUESTRA	UMBRAL	AREA (m2)	LONGITUD FISURA (m)
UM-07 (1)	0.43	1.22	10.41
UM-07 (2)	0.58	0.59	9.68
UM-07 (3)	0.59	1.21	1.96
UM-07 (4)	0.45	0.56	2.20
UM-07 (5)	0.41	0.25	8.76
UM-07 (6)	0.57	1.04	5.24
UM-07 (7)	0.52	0.47	1.68
UM-07 (8)	0.52	0.52	3.89
UM-07 (9)	0.55	1.27	2.82
UM-07 (10)	0.52	0.91	6.01
UM-07 (12)	0.58	1.13	1.13
UM-07 (12)	0.6	0.90	2.17
UM-07 (13)	0.45	1.01	1.00
UM-07 (14)	0.54	1.26	3.54
UM-07 (15)	0.44	0.73	3.84
UM-07 (16)	0.59	0.87	7.01
UM-07 (17)	0.58	0.52	1.14
UM-07 (18)	0.41	0.92	3.31
UM-07 (19)	0.46	1.07	8.86
UM-07 (20)	0.51	1.07	7.79
TOTAL		17.52	92.43